

**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS –  
FATECS  
CURSO: ENGENHARIA CIVIL**

**FLÁVIA DINIZ BATISTA  
MATRÍCULA: 2117624/5**

**ANÁLISE DO CUSTO DE CICLO DE VIDA DE UMA  
PONTE EM CONCRETO ARMADO SUBMETIDA A  
AMBIENTE AGRESSIVO**

Brasília  
2016

**FLÁVIA DINIZ BATISTA**

**ANÁLISE DO CUSTO DE CICLO DE VIDA DE UMA  
PONTE EM CONCRETO ARMADO SUBMETIDA A  
AMBIENTE AGRESSIVO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado junto ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Brasília - UniCEUB como um dos requisitos à obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Orientador (a): Eng.<sup>a</sup> Civil Irene de Azevedo Lima Joffily, M.Sc.

Brasília  
2016

**FLÁVIA DINIZ BATISTA**

**ANÁLISE DO CUSTO DE CICLO DE VIDA DE UMA  
PONTE EM CONCRETO ARMADO SUBMETIDA A  
AMBIENTE AGRESSIVO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado junto ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Brasília – UniCEUB como um dos requisitos à obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Orientador (a): Eng.<sup>a</sup> Civil  
Irene de Azevedo Lima Joffily, M.Sc.

Brasília, 29 de junho de 2016.

**Banca Examinadora**

---

Eng.<sup>a</sup> Civil Irene de Azevedo Lima Joffily, M.Sc.  
Orientadora

---

Eng.<sup>a</sup> Civil Neusa Maria Bezerra Mota, D.Sc.  
Examinadora Interna

---

Eng.<sup>a</sup> Civil Sandra Patrícia Echeverria Fernandez, M.Sc.  
Examinadora Interna

A Deus, por tudo.

Aos meus pais e ao Pedro, vocês são minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus por todas as bênçãos e superação dos obstáculos durante a graduação.

Aos meus pais, Jonas e Maria das Dores, e ao meu irmão, Pedro, que sempre acreditaram na minha capacidade e me apoiaram em minhas decisões.

À minha orientadora e professora, Irene Joffily, por toda dedicação e conduta nessa pesquisa. E por me ajudar ativamente na minha formação acadêmica como, também, na minha formação profissional.

Às engenheiras Carla Castro e Sandra Fernandez, pela ajuda para a realização desta pesquisa.

Aos meus colegas de turma, Roberto, Rafael e Maria José, por todo companheirismo e amizade ao longo desses 5 anos.

Ao Bruno, pelo apoio, amor, carinho e, principalmente, pelo incentivo e compreensão em todos os momentos.

A todos os professores do UniCEUB, por todo o conhecimento dividido e dedicação ao longo da minha formação.

A todos, que de alguma forma, contribuíram com essa jornada, muito obrigada!

## RESUMO

As estruturas de concreto armado presentes em ambientes agressivos apresentam manifestações patológicas, sendo a corrosão de armaduras pela ação de íons cloretos, a principal. Com a corrosão e, juntamente, com a baixa qualidade dos materiais empregados e qualidade da execução da obra tem como resultado um envelhecimento precoce e, conseqüentemente, a diminuição da vida útil. Para atingir a vida útil especificada, uma obra de arte necessita de um projeto de acordo com a durabilidade requerida e considerando a necessidade de manutenções e reparos ao longo do tempo de serviço. Assim, este trabalho tem o objetivo de analisar o custo do ciclo de vida de uma ponte de concreto armado com vida útil de projeto de 100 anos, considerando os parâmetros de projeto previstos nas normas brasileiras e europeias e com o auxílio do software Duracon para estimar a frequência das intervenções e manutenções. A partir daí, observa-se que a probabilidade de corrosão das estruturas utilizando os parâmetros mínimos da norma brasileira é maior. Ao alterar o cobrimento mínimo de 50 para 65mm e o  $f_{ck}$  de 40 para 60 MPa, o aumento no custo inicial é insignificante e o custo da manutenção reduz em 57% considerando a norma Brasileira e 64% para o caso do Eurocódigo.

*Palavras-chaves: concreto; vida útil; custo do ciclo de vida.*

## **ABSTRACT**

Reinforced concrete structures present in aggressive environments present pathological manifestations, being the corrosion of armatures by the action of ions chlorides, the main. With corrosion and, together with the low quality of the materials used and the quality of the execution of the work has as a result an early aging and, consequently, the reduction of service life. To achieve the specified service life, a bridge needs a project in accordance with the durability required and considering the need of maintenance and repairs over time of service. Thus, this research has the objective to analyze the life cycle cost of a bridge of armed concrete with service life of the project for 100 years, whereas the design parameters provided for in the Brazilian norms and European norms and with the aid of the software Duracon to estimate the frequency of interventions and maintenance. From there, it is observed that the probability of corrosion of the structures using the minimum parameters of Brazilian standard is larger. To change the minimum uncovering of 50 to 65 mm and the compressive strenght of 40 to 60 MPa, the increase in the initial cost is insignificant and reduces maintenance cost in 57% whereas the Brazilian standard and 64% for the case of Eurocode.

*Keywords: concrete; service life; life cost cycle.*

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 : CONCEITUAÇÃO DE VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO TOMANDO POR REFERÊNCIA O FENÔMENO DE CORROSÃO DE ARMADURAS. ....	21
FIGURA 2 - RELAÇÃO ENTRE A RELAÇÃO A/AG E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS (AITCIN, 2000). ....	26
FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM CILINDRO DE CONCRETO ARMADO EXPOSTO À ÁGUA DO MAR .....	29
FIGURA 4: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CORROSÃO ELETROQUÍMICA NA PRESENÇA DE CLORETOS.....	30
FIGURA 5: MODELO SIMPLIFICADO PARA CORROSÃO DAS ARMADURAS PROPOSTO POR TUTTI (1982).....	31
FIGURA 6 - COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS VARIANDO A RELAÇÃO A/AGL E A TEMPERATURA (HOFFMANN E DAL MOLIN, 2002). ....	32
FIGURA 7: DESEMPENHO COM E SEM MANUTENÇÃO .....	32
FIGURA 8: REPRESENTAÇÃO DA EVOLUÇÃO DOS CUSTOS EM FUNÇÃO DA FASE DA VIDA DA ESTRUTURA EM QUE A INTERVENÇÃO É FEITA .....	33
FIGURA 9: RELAÇÃO ENTRE CUSTOS DE AQUISIÇÃO E CUSTOS DE MANUTENÇÃO E REPARO SOBRE O PONTO DO CUSTO DO CICLO DE VIDA (CCV) .....	36
FIGURA 10 – SUPERESTRUTURA DA PONTE EM PLANTA .....	39
FIGURA 11 - LOCAÇÃO DOS PILARES .....	39
FIGURA 12 – CORTE DA SEÇÃO LONGITUDINAL .....	39
FIGURA 13 – CORTE DA SEÇÃO TRANSVERSAL .....	40
FIGURA 14 - PARÂMETROS DE ENTRADA DO SOFTWARE DURACON.....	40
FIGURA 15 - FASES DO DESEMPENHO DE UMA ESTRUTURA DURANTE A SUA VIDA ÚTIL [ADAPTADA DO CEB (1992) E HELENE (1992)] .....	46
FIGURA 16 - ÍNDICES DE REAJUSTAMENTO DE OBRAS PÚBLICAS .....	56



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - VIDA ÚTIL DE PROJETO (VUP) MÍNIMA PARA VÁRIAS NORMAS .....	22
TABELA 2 - CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL (CAA) .....	23
TABELA 3 - CLASSE DE RISCOS RELACIONADOS ÀS CONDIÇÕES AMBIENTAIS, EM CONFORMIDADE COM EN 206-1 .....	24
TABELA 4 - RESISTÊNCIA MÍNIMA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DA CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL .....	27
TABELA 5 - CORRESPONDÊNCIA ENTRE A CLASSE DE AGRESSIVIDADE DO MEIO AMBIENTE E O COBRIMENTO NOMINAL PARA $\Delta C = 10\text{MM}$ .....	28
TABELA 6 - RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO DO CLORETO DE VÁRIOS TIPOS DE CONCRETO, COM BASE NA DIFUSIVIDADE RCM AOS 28 DIAS. ....	41
TABELA 7 - DIRETRIZES GERAIS PARA A ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DO CLORETO (Cs) EM ESTRUTURAS DE CONCRETO EM AMBIENTES MARINHOS.....	42
TABELA 8 - DADOS DE ENTRADA NO DURACON .....	44
TABELA 9- PROBABILIDADE DE CORROSÃO – DURACON .....	48
TABELA 10 - INTERVALO DE TEMPO E QUANTIDADE DE MANUTENÇÕES PARA UMA VIDA ÚTIL DE 100 ANOS.....	50
TABELA 11 - FATORES UTILIZADOS PARA A COMPOSIÇÃO DE PREÇO DE CADA COMBINAÇÃO.....	53
TABELA 12 - CUSTO INICIAL DE IMPLANTAÇÃO.....	53
TABELA 13 - ANOS DAS MANUTENÇÕES A SEREM REALIZADAS.....	54
TABELA 14 - TABELA COM OS CUSTOS AO LONGO DE UMA VIDA ÚTIL DE 100 ANOS. ...	57

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - RESULTADOS OBTIDOS NO SOFTWARE DURACON.....	49
GRÁFICO 2 - INTERVALO DE TEMPO E QUANTIDADE DE MANUTENÇÕES PARA UMA VIDA ÚTIL DE 100 ANOS.....	51
GRÁFICO 3 – ANOS DA INTERVENÇÃO X NÚMERO DE INTERVENÇÕES.....	54
GRÁFICO 4 - RELAÇÃO ENTRE OS CUSTOS DAS COMBINAÇÕES.....	57
GRÁFICO 5 - RELAÇÃO ENTRE CUSTO EXECUÇÃO X CUSTO MANUTENÇÃO.....	59
GRÁFICO 6 – CUSTO TOTAL CONSIDERANDO EXECUÇÃO E MANUTENÇÃO .....	60

## **LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações.**

$\Delta_c$  – Tolerância de execução

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BS EN – *British Standard European Norm*

C<sub>nom</sub> – Cobrimento nominal

C<sub>min</sub> – Cobrimento mínimo

CCV – Custo do Ciclo de Vida

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte

NBR – Norma Brasileira Registrada

Relação a/c – Relação água/cimento

VUP – Vida útil de projeto

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1. Problema da Pesquisa.....	15
1.2. Objetivos.....	15
1.2.1. Objetivo Geral.....	15
1.2.2. Objetivos Específicos.....	15
1.3. Hipótese.....	15
1.4. Justificativa.....	16
1.5. Estrutura do Trabalho.....	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.1. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.....	18
2.1.1. Durabilidade.....	18
2.1.2. Vida útil.....	19
2.2. Parâmetros de Norma.....	22
2.2.1. Classe de Agressividade do Ambiente.....	22
2.2.2. Relação a/c.....	24
2.2.3. Classificação dos Concretos.....	25
2.2.4. Espessura do Cobrimento.....	27
2.3. Mecanismo de degradação das armaduras em local agressivo.....	28
2.3.1. Mecanismo de corrosão induzida por cloretos.....	29
2.4. Manutenção e recuperação estrutural.....	32
2.5. Análise do custo do ciclo de vida.....	34
2.6. Softwares para previsão de vida útil.....	36
2.6.1. Duracon (Quick User Guide, 2010).....	36
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>38</b>
3.1. Projeto da ponte.....	38
3.2. Probabilidade de Corrosão das Armaduras.....	40
3.2.1. Parâmetros de entrada.....	41

3.3. Combinações Analisadas.....	43
3.4. Manutenções.....	44
3.4.1. Probabilidade de Corrosão.....	44
3.4.2. Quantidade e intervalos entre as manutenções.....	45
3.5. Custo inicial.....	46
3.6. Custo do ciclo de vida.....	46
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
4.1. Probabilidade de corrosão.....	48
4.2. Manutenções.....	50
4.3. Custo Inicial.....	52
4.4. Custo do ciclo de vida.....	54
4.4.1. Custo da manutenção.....	54
4.4.2. Custo do ciclo de vida.....	56
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>61</b>
5.1. Conclusões.....	61
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	63
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>67</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem crescido o número de estruturas de concreto armado com manifestações patológicas, principalmente com problemas de corrosão de armaduras, como resultado do envelhecimento precoce das construções existentes (HELENE, 2004).

Este envelhecimento precoce é resultado, em algumas situações, da utilização de materiais com baixa qualidade; de erros e da falta de controle no projeto e na execução; da falta de manutenção e do desconhecimento da agressividade do meio ambiente em que a estrutura estará inserida, entre outros. Devido à influência e à interação da estrutura com o meio em que se encontra, conclui-se que nenhum material é intrinsecamente durável, pois suas propriedades tendem a variar.

Segundo Andrade (1997), todo meio técnico acreditava que o concreto era um material que não necessitava de maiores cuidados de manutenção, em função do seu desempenho excelente nas obras. E, assim, foi empregado amplamente em vários diferentes tipos de ambientes sob condições de exposição consideravelmente desfavoráveis, resultando nos processos de deterioração nos últimos anos.

A manutenção é um aspecto bastante carente nas construções, para que uma estrutura atinja a vida útil especificada é necessário que se tenha, além de um controle de qualidade durante a execução, um programa de manutenções preventivas.

Afim de que os custos adicionais sejam racionalizados e obtenham estruturas duráveis, muitos pesquisadores tem buscado metodologias eficientes para a determinação de vida útil das estruturas e alguns softwares foram desenvolvidos com esse objetivo.

Este trabalho analisará o custo do ciclo de vida de uma ponte em um ambiente agressivo, seguindo parâmetros e combinações de acordo com as normas Brasileiras e Europeias, utilizando o software Duracon baseado no

método probabilístico<sup>1</sup> e realizando um programa de manutenções preventivas. Ao final, será concluído o melhor custo benefício a longo prazo.

## **1.1. Problema da Pesquisa**

Como os parâmetros de projeto influenciam no custo do ciclo de vida para uma ponte de concreto armado com vida útil de projeto de 100 anos?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o custo do ciclo de vida de uma ponte em concreto armado em ambiente marinho para uma vida útil de 100 anos, considerando diferentes requisitos de projeto das normas Brasileiras e Europeias por meio da utilização de software para previsão da vida útil.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

De acordo com o objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Comparar a probabilidade de corrosão e necessidade de manutenções da estrutura variando os parâmetros de entrada.
- Apresentar o impacto no custo de execução e manutenção e fazer uma comparação do custo final das diferentes opções.

## **1.3. Hipótese**

A partir dos resultados obtidos, espera-se obter a maior viabilidade econômica, com os parâmetros de projeto mais conservadores do que os

---

<sup>1</sup> Modelos de previsão de vida útil apresentam duas abordagens: uma determinística e outra probabilística/estocástica. Os modelos determinísticos fornecem a estimativa máxima ou média de degradação. Já os probabilísticos são desenvolvidos com base na existência de uma probabilidade de ocorrência dos principais fatores responsáveis pela degradação das estruturas. (POSSAN, 2010)

mínimos presentes nas normas, aumentando o custo de execução, porém reduzindo o custo de manutenção.

#### **1.4. Justificativa**

Segundo Long *et al.* (2001), em muitos países da Europa, aproximadamente 50% do orçamento são gastos em desenvolvimento de construções e infraestrutura. Assim como 50% das despesas com a indústria da construção, são gastos em reparo, manutenção e recuperação.

No Brasil, grande parte das construções encontra-se deterioradas e, com isso, vem crescendo a necessidade de serviços de reparo e manutenção. Resultando em investimentos adicionais que poderiam ser diminuídos ou até mesmo eliminados caso estudos de durabilidade tivessem sido realizados.

Nos Estados Unidos, não é muito diferente, de acordo com Long *et al.* (2001) os gastos atuais referentes à recuperação de estruturas de concreto são estimados na ordem de U\$ 100 bilhões. Logo, observa-se que os gastos com reparos de obras deterioradas é um problema mundial. Portanto, é de grande importância a análise e estudos para que se projetem estruturas economicamente duráveis.

O controle e o aumento na durabilidade e vida útil de estruturas de concreto não são somente importantes do ponto de vista econômico, mas também afeta diretamente a sustentabilidade da nossa sociedade. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que, no futuro, há chances de grandes economias de materiais se iniciarmos a construir bens de consumo que possam durar mais.

A redução da durabilidade promove o aumento do consumo de matérias-primas, produção de poluentes, gastos energéticos e custos adicionais com reparos, renovação e manutenção das construções. Com isso, aumentar a vida útil mostra-se uma boa solução a longo prazo para a preservação de recursos naturais, redução de impactos, economia de energia e prolongamento do potencial de extração das reservas naturais (MEDEIROS *et al.*, 2011).



## 1.5. Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi estruturado em 5 capítulos que serão apresentados a seguir de forma clara e direta para melhor compreensão e entendimento.

- Capítulo 1: Introdução. Este capítulo contempla a introdução, apresentando de forma resumida o tema que será abordado. Apresenta, ainda, os objetivos gerais e específicos, além da hipótese, justificativa e a estrutura do trabalho.

- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica. Neste item, são apresentados os conceitos importantes para a compreensão desta pesquisa, sendo eles: durabilidade e vida útil, parâmetros de normas (Norma Brasileira e Eurocódigo), Mecanismo de degradação das armaduras em local agressivo, manutenção e recuperação estrutural, análise do custo do ciclo de vida e softwares para a previsão do ciclo de vida.

- Capítulo 3: Metodologia. Capítulo onde serão descritas as etapas e os procedimentos adotados para a realização do estudo.

- Capítulo 4: Apresentação e análise dos resultados. Serão apresentados os resultados encontrados e uma análise deles.

- Capítulo 5: Considerações Finais. Por fim, serão descritas as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento da pesquisa, como também serão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**

Antigamente, acreditando que a estabilidade das estruturas estaria segura eternamente, os engenheiros estruturais estudavam somente a resistência do concreto. Devido aos crescentes problemas de degradação e à preocupação com a segurança e qualidade das estruturas e com os custos com a recuperação, os termos durabilidade e vida útil estão ganhando espaço. Com isso, foi abandonada a ideia de que o concreto resistente é concreto durável. Hoje já se encontram, em diversas normas do mundo inteiro, questões sobre a durabilidade e a vida útil das estruturas.

Segunda Da Silva, T. (2002), os conceitos de vida útil e durabilidade são muito próximos, podendo considerar que a vida útil é a quantificação da durabilidade que se supõe ser apenas uma qualidade da estrutura. Com isso, conclui-se que um bom desempenho ao longo da vida útil é sinônimo de durabilidade.

#### **2.1.1. Durabilidade**

A Norma Brasileira ABNT NBR 6118:2014, apresenta diretrizes para a durabilidade das estruturas de concreto, tendo como exigências de durabilidade:

“As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviços durante o prazo correspondente à sua vida útil.”

Uma estrutura durável, algo que todos almejam quando projetam e executam estruturas de concreto armado, é definida pela norma britânica BS EN 1992-1-1 como aquela que cumpre os requisitos de manutenção, resistência e estabilidade ao longo de toda a vida útil de projeto, sem perda significativa de funcionalidade nem manutenção excessiva imprevista.

A durabilidade das estruturas de concreto deve ser considerada resultante das ações realizadas em todas as etapas do processo construtivo (concepção ou planejamento; projeto; fabricação de materiais e componentes; execução; uso e operação da estrutura). Durante a etapa de uso e operação são realizadas as vistorias, monitoramento e manutenções preventivas e corretivas, indispensáveis na consideração acerca da vida útil da estrutura (HELENE, 2004).

O conceito de durabilidade evoluiu muito nos últimos anos, passando de simples constatação de algo que “dura” com o tempo para algo que mantém seus aspectos funcionais e propriedades fundamentais ao longo do tempo. Deixou de ter um significado abstrato e qualitativo, evoluindo para algo real, fruto de ações sistêmicas.

### **2.1.2. Vida útil**

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, vida útil de projeto é o período de tempo em que as características das estruturas de concreto são mantidas, sem intervenções significativas, atendendo aos requisitos de uso e manutenção prescritos bem como aos de reparos necessários decorrentes de danos acidentais. A vida útil aplica-se à estrutura como um todo ou às suas partes. Dessa forma, determinadas partes da estrutura podem possuir vidas útil diferentes.

Assim, a vida útil pode ser entendida como sendo período de tempo compreendido entre o início de operação e uso de uma edificação até o momento em que o seu desempenho deixa de atender às exigências do usuário, sendo diretamente influenciada pelas atividades de manutenção e reparo e pelo ambiente de exposição.

Os requerimentos que limitam a vida útil podem ser técnicos, funcionais ou econômicos. Os aspectos técnicos compreendem aqueles que não relacionados com o uso da estrutura (requisitos para a integridade estrutural da edificação, capacidade resistente dos componentes e materiais). Já os funcionais, estão ligados à capacidade de uma estrutura cumprir o conjunto

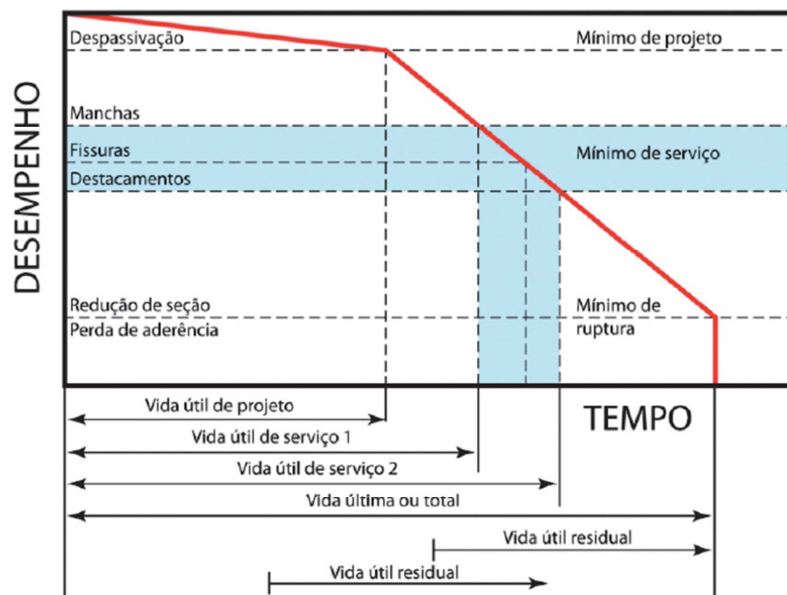
principal de funções para a qual foi projetada. Por fim, os econômicos são relativos aos custos de manutenção necessários para que a estrutura siga em uso (VESIKARI, 1988).

Helene (1993) propôs a conceitualização e definição objetiva de vida útil, mostrando que pode ser distinguida em pelo menos três situações, contemplando o fenômeno da corrosão de armaduras, por ser o mais importante, mais frequente e mais conhecido cientificamente. Estas três situações são a vida útil de projeto (despassivação da armadura), vida útil de serviço ou utilização (aparecimento de manchas, fissuras ou destacamento do concreto de recobrimento) e vida última ou total (colapso ou ruptura parcial ou total da estrutura).

Ainda existe a vida útil residual, correspondendo ao período de tempo em que a estrutura terá capacidade de desempenhar suas funções, contado após a realização de uma vistoria a qual pode ser realizada a qualquer momento da vida útil. Com isso, originando três possíveis vidas úteis residuais: uma mais curta, contada até a despassivação das armaduras; outra até o aparecimento de manchas, fissuras ou destacamento do concreto e outra mais longa contada até a perda significativa da capacidade resistente ou seu eventual colapso.

A Figura 1 apresenta o modelo de vida útil proposto por Helene (1997).

**Figura 1:** Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão de armaduras.



Fonte: (Helene, 1997)

Segundo Helene (1997), o período mínimo de referência para vida útil de uma estrutura de 50 anos foi empregado após muitas discussões da Comissão de Estudos da ABNT<sup>2</sup>. De fato, a vida útil depende de vários fatores, inclusive da importância da obra. Em obras de caráter provisório e ou efêmero é, tecnicamente, recomendável vida útil de projeto de, no mínimo, 1 ano. Já considerando obras de artes, como pontes, e obras de arte permanente poderão ser adotadas períodos de 50, 75 ou até superiores a 100 anos. A Tabela 1 apresenta a vida útil de projeto (VUP) mínima adotada em várias normas existentes no mundo.

<sup>2</sup> Comissão de Estudos da ABNT é o órgão de coordenação, planejamento e execução das atividades de normalização técnica relacionadas com o seu âmbito de atuação, devendo compatibilizar os interesses dos produtores e dos consumidores, contando também com os neutros, que são os representantes de universidades, entidades de pesquisa, governo etc.

**Tabela 1 - Vida útil de projeto (VUP) mínima para várias normas**

Tipo de estrutura	Vida útil de projeto (VUP) mínima				
	BS 7543 (1992)	ISO 2394 (1998)	Fib 34 (2006) e EN 206-1 (2007)	NBR 15575 (2013)	Fib 53 (2010)
Temporárias	≥ 10 anos	1 a 5 anos	≥ 10 anos	-	-
Partes estruturais substituíveis (Ex.: apoios)	≥ 10 anos	≥ 25 anos	10 a 25 anos	23 a 20 anos	25 a 30 anos
Estruturas para agricultura e semelhantes	-	-	15 a 30 anos	-	-
Estruturas <i>offshore</i>	-	-	-	-	≥ 35 anos
Edifícios industriais e reformas	≥ 30 anos	-	-	-	-
Edifícios e outras estruturas comuns	-	≥ 50 anos	≥ 50 anos	50 anos	≥ 50 anos
Edifícios novos e reformas de edifícios públicos	≥ 60 anos	-	-	-	-
Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil	≥ 120 anos	≥ 100 anos	≥ 100 anos	-	≥ 100 anos
Edifícios monumentais	-	-	-	-	≥ 200 anos

Fonte: (POSSAN e DEMONILER, 2014)

## 2.2. Parâmetros de Norma

Uma obra deve resistir à diversas agressões e solicitações durante sua utilização, satisfazendo, constantemente, as condições dos usuários ao longo do tempo. Para isso, as normas existentes possuem um conjunto de requisitos, considerando a agressividade do meio no qual a estrutura encontrar-se-á, a fim de adaptá-las à duração de uso desejada. A seguir, serão descritos alguns desses requisitos.

### 2.2.1. Classe de Agressividade do Ambiente

A agressividade do meio ambiente relaciona-se às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto. Sua classificação tem por base as condições de exposição das estruturas ou suas partes, levando-se em conta o micro e o macroclima atuantes.

Segundo o ponto de vista da durabilidade, a agressividade ambiental é avaliada e classificada, simplificada, pela ABNT NBR 6118:2014, visando projetos correntes, considerando as condições de exposição da estrutura ou de suas partes. Na Tabela 2, é apresentada tal classificação, onde a classe I é a mais fraca e a classe IV a mais forte.

**Tabela 2 - Classes de agressividade ambiental (CAA)**

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Riscos de deterioração da estrutura
I	Frac	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana a,b	Pequena
III	Forte	Marinha a	Grande
		Industrial a,b	
IV	Muito forte	Industrial a,c	Elevada
		Respingos de maré	

a - Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda para ambientes internos secos.  
b - Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.  
c - Ambientes quimicamente agressivos.

Fonte: (ABNT NBR 6118:2014)

Na Europa, a classificação de agressividade é mais rigorosa e detalhada, como é observado na Tabela 3.

**Tabela 3** - Classe de riscos relacionados às condições ambientais, em conformidade com EN 206-1

Classe de agressividade	Descrição do ambiente
<b>1. Nenhum risco de corrosão nem de ataque</b>	
X0	- Para o concreto sem reforço ou metal incorporado: todas as exposições , exceto congelamento/descongelamento , abrasão ou ataque químico; - Para betão com reforço ou metal incorporado: muito seco
<b>2. Corrosão induzida por carbonatação</b>	
XC1	- Seco ou constantemente molhado
XC2	- Molhado, raramente seco
XC3	- Umidade moderada
XC4	- Intervalos molhado e seco
<b>3. Corrosão induzida por cloretos</b>	
XD1	- Umidade moderada
XD2	- Molhado, raramente seco
XD3	- Intervalos molhado e seco
<b>4. Corrosão induzida por cloretos presentes na água do mar</b>	
XS1	- Exposto ao sal no ar , mas não em contato direto com a água do mar
XS2	- Constantemente submerso
XS3	- Respingos de maré, regiões com névoa salina, sujeitas à projeções de sais
<b>5. Ataque gelo/degelo</b>	
XF1	- Saturação moderada de água sem agente de degelo
XF2	- Saturação moderada de água com agente de degelo
XF3	- Saturação alta de água sem agentes de degelo
XF4	- Saturação alta de água com agentes de degelo
<b>6. Ataque químico</b>	
XA1	- Ambiente químico ligeiramente agressivo
XA2	- Ambiente químico moderadamente agressivo
XA3	- Ambiente químico altamente agressivo

Fonte: (BS EN 1992-1-1:2014)

### 2.2.2. Relação a/c

A relação água/cimento é, comprovadamente, um fator de grande importância para as propriedades do concreto e para sua durabilidade. Existe uma relação entre esse fator e a porosidade, indiretamente considerada nos coeficientes de difusão e permeabilidade. Todos os fatores que afetam a porosidade do concreto interferem também na sua permeabilidade e capacidade de absorção e, portanto, na sua resistência ao ataque químico.



Em busca de melhor durabilidade, deve-se obter uma baixa permeabilidade, para isso se faz necessário uma relação água/cimento baixa. Geralmente, concretos com reduzida relação a/c possuem baixa porosidade e permeabilidade, logo dificulta a penetração de cloretos, CO<sub>2</sub> e outros agentes agressivos que causam a incidência de corrosão nas armaduras presentes na estrutura.

Considerando a classe IV (respingos de maré) na norma brasileira e a classe XS3 correspondente a tal agressividade nos Eurocódigos, a relação a/c especificada deve ser menor ou igual a 0,45 para ABNT NBR 6118:2014 e menor que 0,50 para BS EN 1992-1-1:2014. Nota-se que em relação a esse parâmetro, uma proximidade na especificação sendo a norma brasileira ainda mais rígida.

### **2.2.3. Classificação dos Concretos**

A durabilidade das estruturas é altamente dependente das características do concreto e da espessura e qualidade do concreto do cobrimento (ABNT NBR 6118:2014).

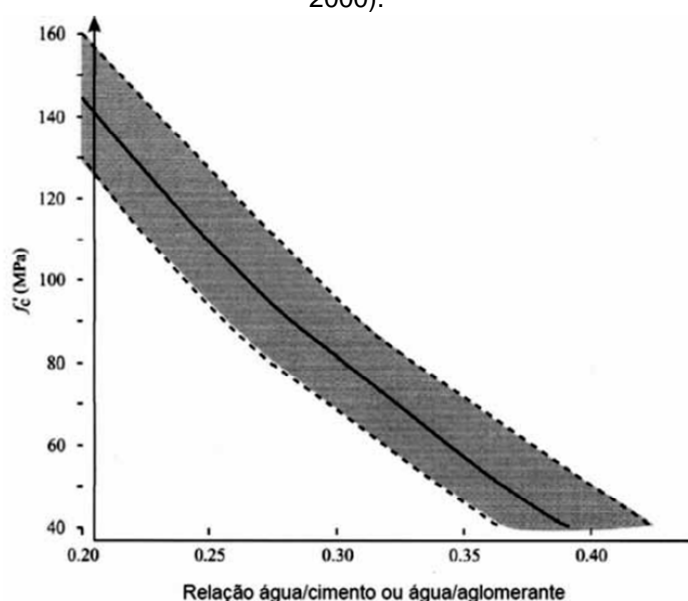
Helene (2004) afirma que a qualidade efetiva do concreto na obra deve ser assegurada por um procedimento correto de mistura, transporte, lançamento, adensamento, desmoldagem e cura. Ainda que um concreto de alta resistência seja, em certas situações, potencialmente mais durável do que um concreto de resistência mais baixa, a resistência à compressão não é, inteiramente, um requisito suficiente da durabilidade do concreto, pois esta depende das camadas superficiais da estrutura.

A qualidade efetiva do concreto superficial de cobrimento e de proteção à armadura depende da adequabilidade da fôrma, do aditivo desmoldante e, preponderantemente, da cura dessas superfícies. Em especial devem ser curadas as superfícies expostas precocemente, devido à desmoldagem, tais como fundo de lajes, laterais e fundos de vigas e faces de pilares e paredes (HELENE, 2004).

Concretos de boa qualidade, ou seja, com resistência elevada e/ou baixa relação água/cimento, são pontos chaves para durabilidade das estruturas, pois contribuem para a proteção da armadura imersa no concreto (POSSAN, 2010).

A Figura 2 correlaciona a relação a/c com a resistência à compressão aos 28 dias, com base em vários resultados obtidos em pesquisas.

**Figura 2** - Relação entre a relação a/ag e a resistência à compressão aos 28 dias (AITCIN, 2000).



Fonte: (TUTIKIAN *et al.*, 2011)

As normas existentes focam na qualidade do concreto como critério de projeto que objetiva a durabilidade das estruturas, especificando a resistência do concreto em relação à agressividade a qual a estrutura estará exposta para que se projetem estruturas, além de esbeltas e econômicas, mas sobretudo duráveis. A tabela 4 correlaciona a resistência em função da classe de agressividade ambiental IV (para a ABNT NBR 6118:2014) e da classe XS3 (para o Eurocódigo).

**Tabela 4** - Resistência mínima à compressão em função da classe de agressividade ambiental

	<b>NBR 6118</b>	<b>EUROCÓDIGOS (NF EN 1990, NF EN 1992-1-1, NF EN 206)</b>
<b>classe de agressividade</b>	IV	XS3
<b>classe do concreto</b>	C40	C 35/45

Fonte: (ABNT NBR 6118:2014; BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2014)

## 2.2.4. Espessura do Cobrimento

Determinado como a menor distância entre qualquer superfície de concreto e a superfície da barra da armadura mais próxima, o cobrimento é considerado uma das principais medidas de proteção das estruturas de concreto armado, principalmente em relação à prevenção da corrosão das armaduras (Brandão, 1998).

De acordo com González e Andrade (1980), um cobrimento adequado garante a proteção do aço ao ataque de agentes agressivos externos e constitui uma barreira contra a penetração de agentes agressivos. Com isso, um cobrimento especificado corretamente em função da classe de agressividade ambiental, juntamente com outros parâmetros já citados neste trabalho, garantem uma melhor durabilidade às estruturas de concreto armado.

O cobrimento mínimo da armadura deve ser conceituado como o menor valor obtido ao longo de todo o elemento estrutural. Para garantir o cobrimento mínimo ( $C_{min}$ ), o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal ( $C_{nom}$ ), que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução ( $\Delta_c$ ), que deve ser maior ou igual a 10mm para as obras correntes e 5mm para as obras com controle de qualidade rígido. Com isso, deve-se seguir a equação a seguir:

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta_c$$

Onde:

$C_{nom}$  = cobrimento nominal.

$C_{min}$  = cobrimento mínimo.

$\Delta_c$  = tolerância de execução.

A tabela 5 correlaciona os cobrimentos especificados nas normas brasileiras e europeias em função da classe de agressividade ambiental considerada muito forte, definida por regiões onde há respingos de maré.

**Tabela 5** - Correspondência entre a classe de agressividade do meio ambiente e o cobrimento nominal para  $\Delta_c = 10\text{mm}$

	NBR 6118		EUROCÓDIGOS (NF EN 1990, NF EN 1992-1-1, NF EN 206)
classe de agressividade	IV		XS3
cobrimento	laje	45 mm	65 mm
	viga / pilar	50 mm	

Fonte: (ABNT NBR 6118:2014; BAROGHEL-BOUNY et al., 2014; BS EN 1992-1-1:2014)

## 2.3. Mecanismo de degradação das armaduras em local agressivo

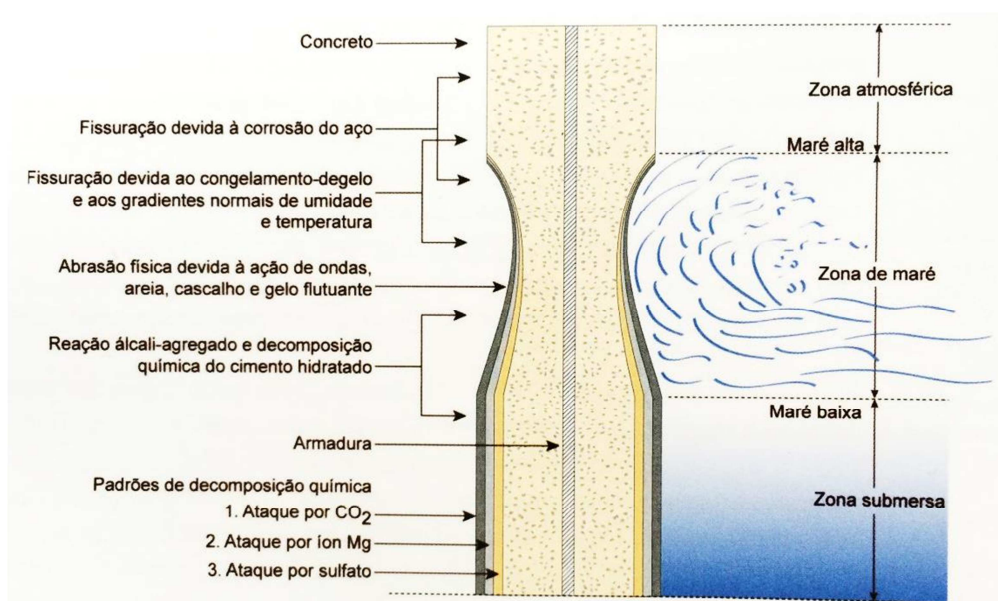
A ação da água do mar no concreto armado causa ataques simultâneos de vários processos físicos e químicos de deterioração. O ataque ao concreto, devido a qualquer um dos ataques presentes no meio, tende a aumentar a permeabilidade. Com isso, a estrutura torna-se mais vulnerável às ações continuadas pelo mesmo agente destrutivo, como também a outros tipos de ataque (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A corrosão induzida pela penetração de íons cloreto pode ser considerada como principal causa de deterioração das armaduras em ambiente marinho, devido à alta concentração de íons cloreto presentes na composição da água do mar, porém a carbonatação também ocorre.

### 2.3.1. Mecanismo de corrosão induzida por cloretos

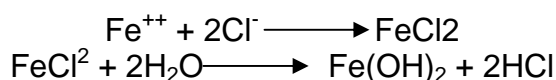
O íon cloreto quando em contato com a superfície de concreto age como um acelerador do processo corrosivo, prejudicando, significativamente, a vida útil da estrutura. Na parte em que o concreto se encontra submerso, os cloretos ingressam até uma profundidade considerável, porém a corrosão não se faz muito presente. Já em locais onde o concreto está seco, exposto à água do mar, o ingresso de cloreto é progressivo devido à molhagem e secagem alternada, contribuindo para uma zona mais agressiva como demonstrado na Figura 3.

**Figura 3:** Representação esquemática de um cilindro de concreto armado exposto à água do mar

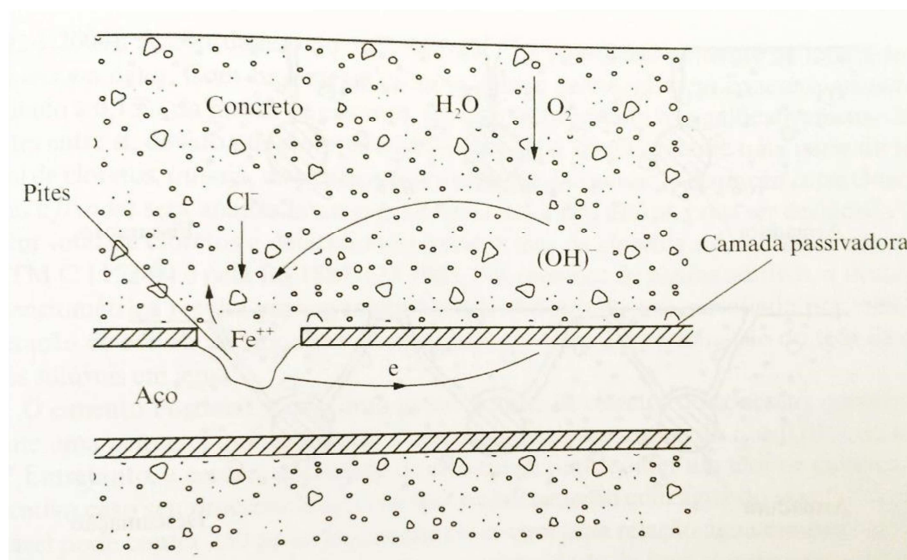


Fonte: (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

O processo de corrosão tem início a partir da penetração do íon  $\text{Cl}^-$  através da água, na camada de cobrimento, atingindo a camada passivadora (cátodo). Dependendo da porosidade do concreto, os íons atingem a armadura formando o ânodo (ALVES, 2007). A seguir são apresentadas as reações envolvidas em tal processo e na Figura 4 é apresentada, esquematicamente, a corrosão descrita.



**Figura 4:** Representação esquemática da corrosão eletroquímica na presença de cloretos

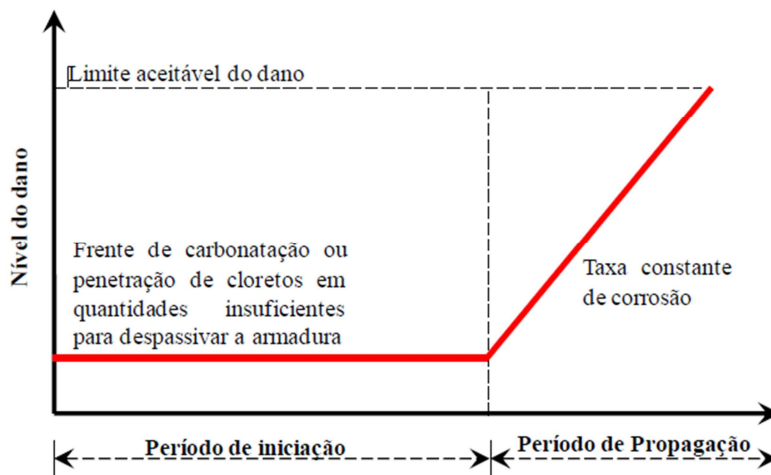


Fonte: (NEVILLE, 2016)

Segundo Alves (2007), a ação dos cloretos origina a despassivação da armadura, deteriorando o elemento estrutural de forma progressiva. Além disso, também aumenta significativamente a condutividade elétrica acelerando o processo de corrosão, sendo altamente prejudicial ao concreto armado. Com a corrosão, ocorre o aparecimento de manchas, fissuras, destacamentos de pedaços de concreto e, até, perda da seção resistente.

Possan (2010) menciona que um modelo simplificado criado por Tutti, divide o processo de degradação em dois períodos: iniciação e propagação, segundo apresentado na Figura 5. A iniciação representa o intervalo de tempo necessário para que os agentes agressivos penetrem através do cobrimento até atingirem a armadura, ocasionando a despassivação. O segundo período, propagação, é onde os agentes agressivos atingem as armaduras, iniciando a corrosão e gerando diversas manifestações patológicas na estrutura.

**Figura 5:** Modelo simplificado para corrosão das armaduras proposto por Tutti (1982)

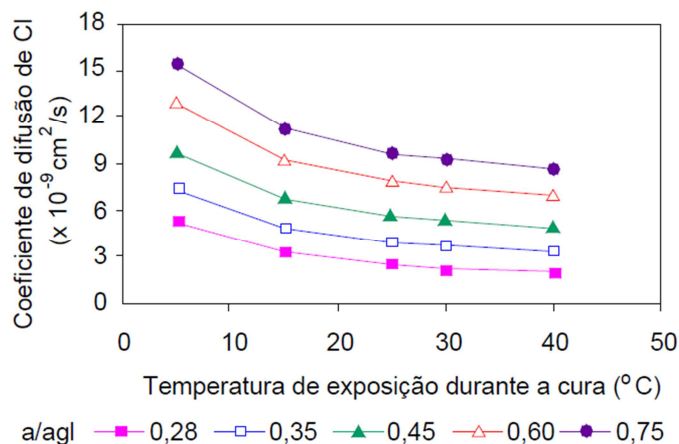


Fonte: (POSSAN, 2010)

A espessura da camada de cobrimento e a qualidade do concreto (resistência) vão impedir ou minimizar a penetração do cloreto para o interior da estrutura, portanto a necessidade de procedimentos de qualidade quanto à permeabilidade da camada de cobrimento deve ser estendida ao controle da relação água/cimento. É a camada de cobrimento que vai garantir a qualidade do concreto quanto à expectativa de vida útil (ALVES, 2007). Portanto, deve-se atentar as especificações referentes a esses fatores quanto à classe de agressividade a qual a estrutura estará exposta.

Segundo Da Silva, F. (2006), a temperatura também tem influência na velocidade da corrosão. Com o acréscimo de temperatura, as partículas presentes na estrutura do concreto se agitam, causando uma maior mobilidade e, assim, facilitando o transporte dos íons para o seu interior. Com isso, o coeficiente de difusão de cloretos diminui com o aumento da temperatura e com a diminuição da relação água/cimento, como mostrado na Figura 6.

**Figura 6** - Comportamento do coeficiente de difusão de cloretos em concretos variando a relação a/agl e a temperatura (HOFFMANN e DAL MOLIN, 2002).

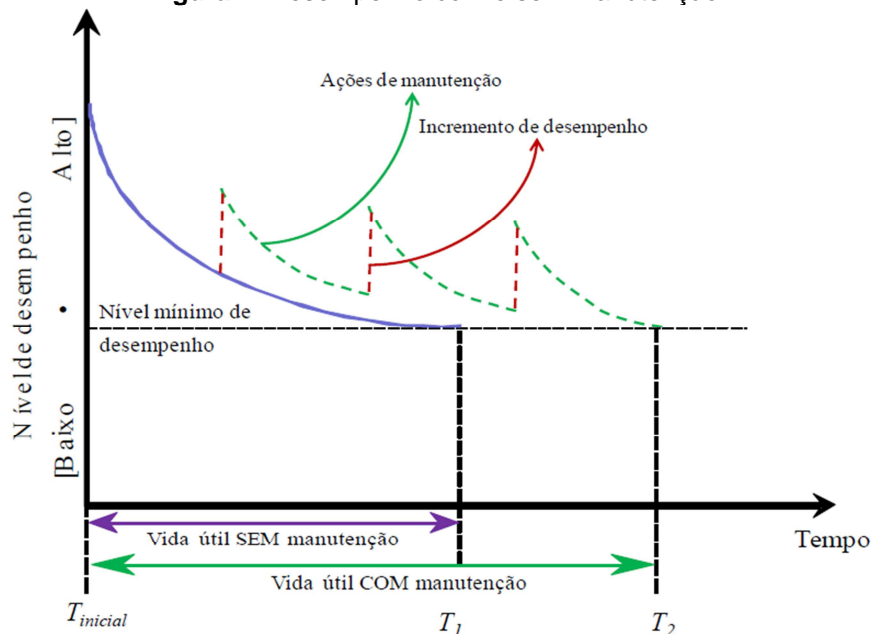


Fonte: (DA SILVA, F., 2006)

## 2.4. Manutenção e recuperação estrutural

As atividades de manutenção e reparo influenciam diretamente na vida útil das estruturas. A Figura 7 mostra a influência das ações de manutenção em uma edificação, pode-se observar a importância das ações de manutenção para garantir a VUP da obra.

**Figura 7:** Desempenho com e sem manutenção

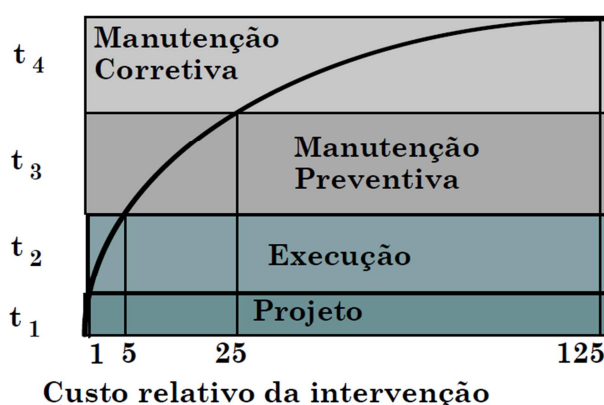


Fonte: (POSSAN e DEMONILER, 2014)



Helene (2004) afirma que do ponto econômico, as medidas tomadas a nível de projeto, visando a durabilidade, são mais convenientes, seguras e baratas que medidas protetoras tomadas posterior a fase de projeto. Os custos da intervenção crescem exponencialmente em função do tempo. Quanto mais tardia for a manutenção, mais alto será seu valor. A evolução desse custo pode ser assimilado ao de uma progressão geométrica de razão 5, conhecida por lei dos 5 ou Regra de Sitter, demonstrado na Figura 8.

**Figura 8:** Representação da evolução dos custos em função da fase da vida da estrutura em que a intervenção é feita



Fonte: (HELENE, 2004)

Como observado no Figura 8, são quatro fases, a fase de projeto, a fase de execução, a fase de manutenção preventiva e a fase de manutenção corretiva. Helene (2004) descreve cada uma:

- Na fase de projeto, toda medida tomada a fim de aumentar a proteção e a durabilidade, como: aumentar o cobrimento da armadura, reduzir a relação  $a/c$ , aumentar o  $f_{ck}$ , especificar adições ou tratamentos protetores de superfície, implica num custo de número 1 (um);
- Na fase de execução, as medidas tomadas implicam num custo 5 (cinco) vezes maior que o custo se a medida equivalente fosse exercida na fase anterior. Essas medidas adotadas em nível de obra, apesar de eficazes e oportunas do ponto de vista da vida útil,

não resultam na mesma economia caso fossem realizadas na fase de projeto;

- Na fase de manutenção preventiva, as operações isoladas de manutenção (pinturas, limpeza de fachadas sem beirais e sem proteção, impermeabilização de coberturas, reservatórios mal projetados e outras) necessárias para ratificar as boas condições da estrutura durante sua VUP, podem custar até 25 vezes mais que se fossem tomadas medidas corretas na primeira fase;
- A fase de manutenção corretiva refere-se aos trabalhos de diagnósticos, reparo, reforço e proteção das estruturas que já perderam sua vida útil de projeto e apresentam patologias evidentes. Tais trabalhos custam 125 vezes mais ao custo de providências que deveriam ter sido tomadas na fase inicial as quais resultariam em um mesmo nível de durabilidade.

As medidas preventivas consistem em dificultar o ingresso dos agentes agressivos ao interior do concreto e em aumentar ou manter seu desempenho estrutural. Assim, quando a estrutura começa a perder sua funcionalidade em função de alguma deterioração, há a necessidade da realização dos reparos ou reforços.

## **2.5. Análise de custo do ciclo de vida**

O aumento dos custos envolvendo a reposição de estruturas e o destaque crescente no custo do ciclo de vida mais do que no custo inicial, força os engenheiros a darem mais atenção às questões de durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

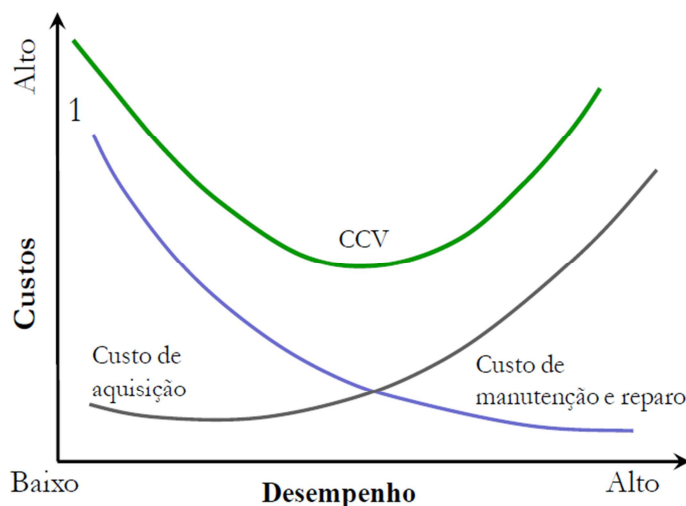
Possan (2010) pronuncia que, a análise do custo do ciclo de vida (CCV) é um método importante de avaliação de desempenho econômico com alto uso em projetos de engenharia, em especial, na tomada de decisão, sendo significativo para:

- Seleção de possibilidades para novos projetos e intervenções nos existentes;
- Substituição ou reparo em sistemas ou componentes da construção;
- Redução do CCV de uma obra ao todo ou suas partes;
- Definição de prazos para manutenções, reparo e reabilitações;
- Análise do custo ambiental decorrente da demolição prematura de uma construção e estudos de impactos ambientais;
- Tomada de decisão de projeto para escolha de um elevado investimento inicial analisando seu desempenho e custos de vida útil.

Análise do Custo do Ciclo de Vida pode ser uma importante ferramenta para avaliar a eficiência do custo de várias soluções técnicas que visam aperfeiçoar um projeto de durabilidade como também pode avaliar o estado de conservação, manutenção e reparos, durante a etapa de operação da estrutura (GJORV, 2015).

Os fatores participantes no projeto, execução e manutenção são considerados ao longo do tempo incluindo seus custos associados, portanto, contribui na identificação de alternativas que possam conduzir a custos menores de operação, manutenção, reparo e reabilitação. Assim tem-se a curva de desempenho e uma de custos ao longo do tempo (POSSAN e DEMONILER, 2014), demonstrada na Figura 9.

**Figura 9:** Relação entre custos de aquisição e custos de manutenção e reparo sobre o ponto do custo do ciclo de vida (CCV)



Fonte: (POSSAN e DEMONILER, 2014)

Possan e Demoniler (2014) acreditam que a análise do CCV pode ser uma justificativa de altos investimentos iniciais do projeto em razão dos benefícios econômicos ao longo do tempo. Também ressaltam que essa análise exige visão sistêmica e multidisciplinar.

## 2.6. Softwares para previsão de vida útil

Como pode ser observado anteriormente, a durabilidade e a vida útil das estruturas estão sendo objetos de pesquisa dentro da área de Engenharia Civil. Em princípio, a previsão da vida útil pode ser feita através de alguns modelos matemáticos já existentes e conhecidos. Com tanta atenção a este assunto, a previsão da vida útil vai se sofisticando e resulta nos desenvolvimentos de softwares. Para a realização desta dissertação foi utilizado o software Duracon, que será descrito a seguir.

### 2.6.1. Duracon (Quick User Guide, 2010)

O software DURACON foi, principalmente, desenvolvido a fim de proporcionar um suporte para a análise de durabilidade com base probabilística de estruturas de concreto em ambientes agressivos.

O software é baseado na segunda lei da difusão de Fick combinada com a simulação Monte Carlo para o cálculo da penetração de íon cloreto até o momento da despassivação, ajustado para permitir a dependência da difusividade do cloreto e dos efeitos da temperatura. O objetivo principal do software é fornecer uma base para um julgamento de engenharia das características mais importantes relacionadas com a durabilidade da estrutura, incluindo a sua variabilidade. Assim, pode ser considerado adequado para comparar e selecionar uma das várias soluções técnicas para uma melhor durabilidade.

Como resultado, o DURACON apresenta os valores da probabilidade de corrosão em relação aos anos da vida útil especificada. Segundo Gjorv (2015), é considerado como término da vida útil de projeto o instante em que, probabilisticamente, 10%, da armadura da área exposta e sujeita à ação de cloretos fica despassivada.

### **3. METODOLOGIA**

Nesse trabalho será analisado o custo do ciclo de vida de uma ponte em concreto armado para uma vida útil de 100 anos. Realizou-se um estudo com auxílio do software Duracon e a partir de parâmetros de entrada, de acordo com as normas, para alcançar o objetivo proposto.

Considerando que o objetivo deste trabalho seja a análise do custo do ciclo de vida de uma ponte em ambiente agressivo de acordo com parâmetros das normas brasileiras e europeias. Primeiramente, serão apresentados os parâmetros de entrada do software Duracon a fim de obter a probabilidade de corrosão ao longo da vida útil. Com as porcentagens obtidas, poderemos delimitar o número de manutenções e seu intervalo ao longo dos 100 anos.

Para que se chegue ao objetivo, análise do custo do ciclo de vida, é calculado o valor inicial para a construção da estrutura de concreto armado desta ponte, considerando somente os materiais utilizados. Em seguida, é definida a manutenção a ser realizada e seu devido valor orçamentário, com a junção do custo inicial com os valores das manutenções necessárias é encontrado o custo ao longo de sua vida útil.

#### **3.1. Projeto da ponte**

A ponte modelo para este trabalho é considerada de pequeno porte, com uma largura de 12,80 metros, comprimento de 40 metros e uma altura de 6,5 metros, considerando da base do pilar até o topo da laje principal e especificado cobrimento de 3 cm.

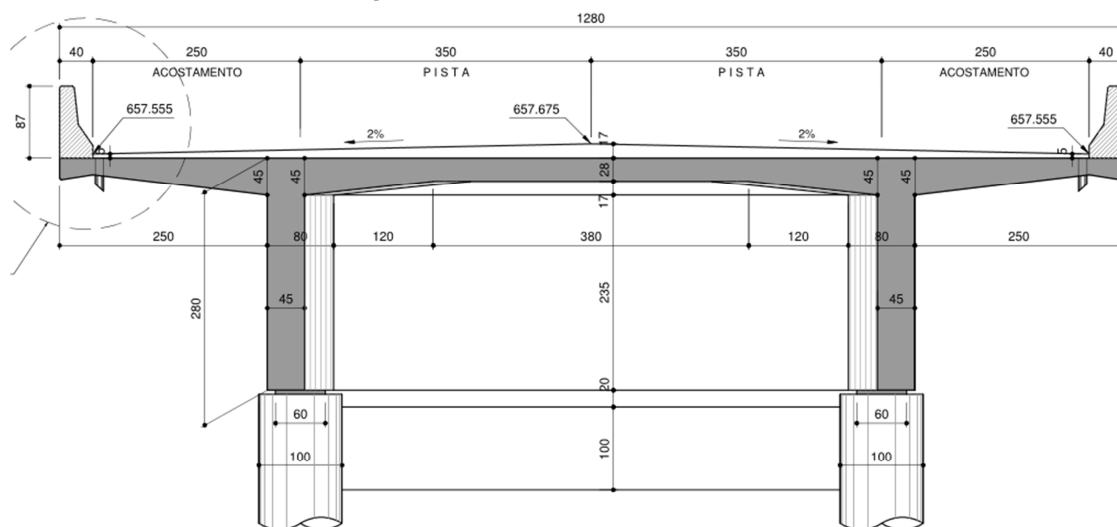
Para esta pesquisa serão observados somente as parte principais desta obra de arte, sendo elas:

- Laje principal;
- Duas vigas principais em sentido longitudinal da ponte;
- Duas vigas de ligação dos pilares em sentido transversal;
- Quatro pilares circulares.

As Figuras de 10 a 13 mostram croquis da ponte em estudo.



**Figura 13 – Corte da seção transversal**



### 3.2. Probabilidade de Corrosão das Armaduras

O software utilizado na pesquisa foi o Duracon, desenvolvido pelo professor Gjorv na Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (NTNU). O primeiro passo é delimitar seus parâmetros de entrada que estão demonstrados na Figura 14, em vermelho.

**Figura 14 - Parâmetros de entrada do software Duracon**

xc (mm)	Dcoef (1e-12m2/s)	Ccr (%wt.conc.)	Cs (%wt.conc.)	n (-)	t (years)	to (days)	T (Celcius)	te (days)
#1_3_5_7_9_#2_4_6_8_0_#1_3_5_7_9_#2_4_6_8_0_#1_3_5_7_9_#2_4_6_8_0_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_#1_3_5_7_9_								
55.00	3.500	0.48	2.500	0.37	00.00	28.0	20.0	180.0 ;
5.00	0.260	0.10	0.540	0.07	50.00	00.0	00.0	00.0 ;

Fonte: (Duracon Quick User Guide, 2010)

Na primeira linha em vermelho significa o tipo da distribuição podendo ser 0 para distribuição normal, 1 para distribuição lognormal, 2 para distribuição beta e 7 para determinístico (parâmetros de tempo). Para a realização desse trabalho, foi considerado os mesmos tipos já definidos pelo software.

A segunda linha representa valores nominais de cada parâmetro e, na terceira, o desvio padrão referente a cada um. A seguir, será apresentado cada parâmetro utilizado.



### 3.2.1. Parâmetros de entrada

#### ▪ Cobrimento do concreto ( $X_c$ )

Para a norma brasileira, o cobrimento mínimo necessário para a classe de agressividade IV seria de 45 mm para lajes e 50 mm para pilares e vigas, na análise considera-se toda a estrutura com 50 mm. Também serão realizadas combinações para a norma brasileira considerando o cobrimento de 65 mm.

Já o Eurocódigo, considerando a agressividade ambiental XS3, especifica um cobrimento mínimo de 65 mm.

O desvio padrão foi definido através de estudos de caso apresentados na literatura de Gjorv (2015), considerando a ponte em questão sendo fictícia impedindo de fazer o controle do cobrimento para obtenção do desvio padrão.

#### ▪ Coeficiente de difusão do cloreto ( $D_{coef}$ )

Para os valores desse parâmetro, baseou-se na Tabela 6 que apresenta valores gerais como base para uma avaliação abrangente da resistência de penetração do cloreto pelo princípio em ensaio da difusividade RCM aos 28 dias.

**Tabela 6** - Resistência a penetração do cloreto de vários tipos de concreto, com base na difusividade RCM aos 28 dias.

Difusividade do cloreto, $D_{28} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Resistência à penetração do cloreto
>15	Baixa
10 - 15	Moderada
5 - 10	Alta
2,5 - 5	Muito alta
< 2,5	Extremamente alta

Fonte: (GJORV, 2015)

Como tal parâmetro é obtido por meio de ensaios e testes *in loco*, não se tem os valores reais para esta análise. Então, para este trabalho, utilizou a média das difusividades das resistências moderada, alta e muito alta presentes na Tabela 8. Com isso, resultou-se em três categorias com difusividade no valor de  $12,5 \times 10^{12} \text{ m}^2/\text{s}$  (resistência moderada),  $7,55 \times 10^{12} \text{ m}^2/\text{s}$  (resistência alta) e  $3,75 \times 10^{12} \text{ m}^2/\text{s}$  (resistência muito alta).

- **Teor crítico de cloreto que inicia a corrosão das armaduras (Ccr)**

Este valor é obtido nas normas, sendo a norma brasileira ABNT NBR 12655/2015 especifica o teor máximo de íons cloreto no concreto em ambientes de classe de agressividade IV igual a 0,15% sobre a massa de cimento. Já o Eurocódigo define este teor como sendo de 0,4%.

O desvio padrão foi delimitado com base em estudos de caso presente na literatura de Gjorv (2015).

- **Teor de cloreto na superfície da estrutura (Cs)**

O teor crítico na superfície também é recomendado que seja obtido através de ensaios e testes na própria estrutura. Como trata-se de uma previsão, baseou-se na Tabela 7 para estimar a concentração de cloreto, adotando um valor médio de teor crítico entre a ação ambiental alta e média, de 4,5 e o desvio padrão baseado em estudos de caso das literaturas presentes na bibliografia, de 0,9.

**Tabela 7** - Diretrizes gerais para a estimativa da concentração do cloreto (Cs) em estruturas de concreto em ambientes marinhos.

Ação ambiental	Cs (% por massa do cimento)	
	Valor médio	Desvio padrão
Alta	5,5	1,3
Média	3,5	0,8
Moderada	1,5	0,5

Fonte: (GJORV, 2015)

- **Fator idade (n)**

Este coeficiente depende do tipo de cimento utilizado. Como no Brasil, usa-se cimento Portland, segundo Gjorv (2015) o fator idade correspondente a esse tipo tem valor de 0,4 e desvio padrão de 0,08.

- **Vida útil de serviço pretendida (t)**

Seria o valor referente à vida útil projetada, no caso, 100 anos.

- **Idade do concreto quando testado (te)**

Esta idade é correspondente ao tempo em que o concreto foi testado. No caso, utiliza-se o Dcoef para 28 dias, logo a idade considerada em testes foi de 28 dias.

- **Temperatura anual do local (T)**

O Brasil é um país com uma das maiores extensões territoriais do mundo. Devido a isso, as temperaturas médias anuais variam de região a região. De acordo com dados da FIBGE, temperaturas máximas acima de 40°C são observadas no interior da região nordeste, por exemplo. Enquanto temperaturas mínimas, chegando a serem negativas, encontram-se em grande parte na região sul.

Assim, para a análise deste trabalho, adotou-se uma cidade para fixar a temperatura média anual. A cidade escolhida foi Florianópolis – SC, em que a temperatura média anual é de 20°C.

- **Idade do concreto quando exposto aos cloretos (to)**

Considerada a idade correspondente ao momento em que a estrutura entra em contato com a água do mar. Pode-se delimitar tal idade como 28 dias, segundo estudos de caso realizados por Gjorv (2015).

### **3.3. Combinações analisadas**

Foram realizadas nove combinações, variando os parâmetros de entrada de cobrimento, coeficiente de difusão do cloreto e teor crítico de cloreto, que foi de 0,15% para a norma brasileira e 0,4% para a europeia. A análise consistiu em seis combinações utilizando os parâmetros da norma brasileira ABNT NBR 6118/2014 e os restantes baseados nas especificações presentes no Eurocódigo.

A Tabela 8 apresenta os dados e as combinações utilizados no Duracon. Sendo os números em parênteses os respectivos desvios-padrão adotados.

**Tabela 8 - Dados de entrada no Duracon**

	Nomenclatura	Classe de Agressividade	Cobrimento (mm)	Dcoef ( $\times 10^{12}$ m <sup>2</sup> /s)	Ccr (%)	Cs (%)	n	t (anos)	to (dias)	T (Celsius)	te (dias)
<b>NBR 6118</b>	Ia	IV	50 (5)	12,5 (1,25)	0,15 (0,03)	4,5 (0,9)	0,4 (0,08)	100	28	20	28
	Ib	IV	50 (5)	7,5 (1,25)	0,15 (0,03)	4,5 (0,9)	0,4 (0,08)	100	28	20	28
	Ic	IV	50 (5)	3,75 (1,25)	0,15 (0,03)	4,5 (0,9)	0,4 (0,08)	100	28	20	28
	Id	IV	65 (5)	12,5 (1,25)	0,15 (0,03)	4,5 (0,9)	0,4 (0,08)	100	28	20	28
	Ie	IV	65 (5)	7,5 (1,25)	0,15 (0,03)	4,5 (0,9)	0,4 (0,08)	100	28	20	28
	If	IV	65 (5)	3,75 (1,25)	0,15 (0,03)	4,5 (0,9)	0,4 (0,08)	100	28	20	28
<b>Eurocódigos</b>	IIa	SX3	65 (5)	12,5 (1,25)	0,4 (0,08)	4,5 (0,9)	0,4 (0,08)	100	28	20	28
	IIb	SX3	65 (5)	7,5 (1,25)	0,4 (0,08)	4,5 (0,9)	0,4 (0,08)	100	28	20	28
	IIc	SX3	65 (5)	3,75 (1,25)	0,4 (0,08)	4,5 (0,9)	0,4 (0,08)	100	28	20	28

Como principal dado de saída, o software apresenta a probabilidade de corrosão das armaduras ao longo dos 100 anos, designados como vida útil de projeto o tempo para atingir 10% de probabilidade de corrosão. A partir desses resultados estipulou-se a quantidade e o intervalo necessários para realizar a manutenção a fim de que a vida útil especificada seja garantida.

### 3.4. Manutenções

#### 3.4.1. Probabilidade de Corrosão

Para especificar a quantidade e o intervalo das manutenções preventivas, é preciso definir com qual probabilidade de corrosão será necessária a intervenção.

Baseando-se no software utilizado e na literatura de Gjorv (2015), considera-se que a probabilidade de corrosão com valores até 10%, a estrutura não apresenta sinais visíveis de degradação, porém a corrosão já está em fase de iniciação.

Entretanto, neste trabalho, a adotou-se a probabilidade de corrosão de 50%, apesar de superior ao que a literatura adota. Atualmente, devido à limitação de verba, as manutenções são executadas apenas quando a penetração de cloreto se encontra avançada e a corrosão em nível significativo, com deslocamentos do concreto. Portanto, as manutenções serão consideradas corretivas, como geralmente ocorre nas estruturas no Brasil.

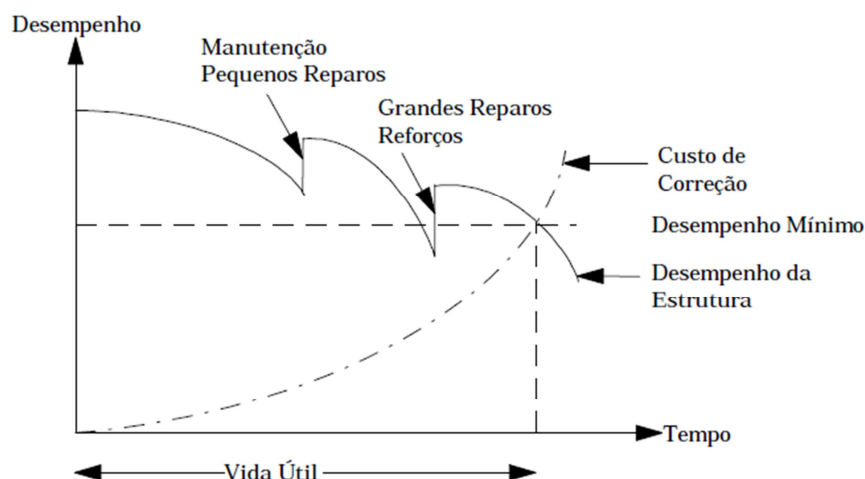
As manutenções que foram consideradas neste trabalho são apenas o reparo do concreto, sabendo que no caso da corrosão por cloreto, é imprescindível a execução de outras ações como proteção galvânica ou outras, para inibir o processo de ataque do aço por cloreto. Lembrando que, na prática, uma ponte pode necessitar não somente desta, mas de outros tipos de manutenções como substituição de aparelhos de apoio, recuperação de danos proveniente de vandalismo e acidentes, dentre outros. Para isso, devem-se realizar ensaios e inspeções *in loco* para monitoramento da estrutura.

### **3.4.2. Quantidade e intervalos entre as manutenções**

Definido a probabilidade para realizar a primeira manutenção, de acordo com os resultados obtidos analisou-se em quantos anos, provavelmente, a probabilidade de corrosão seria 50%.

Com o primeiro intervalo de tempo definido para a primeira manutenção, baseado na Figura 15, adotou-se que os intervalos entre as manutenções serão regulares, até atingir a vida útil de projeto de 100 anos. As manutenções foram consideradas como reparo e não reabilitação da estrutura. Porém, na prática, os intervalos variam e são diferentes entre uma manutenção e outra, para determiná-los é necessário a realização de inspeções e acompanhamento da estrutura analisada e, principalmente, o monitoramento por meio de ensaio para prognóstico. Sendo que a tendência é o intervalo diminuir ao longo do tempo ou o custo do mesmo aumentar como exemplifica a lei de Sitter.

**Figura 15** - Fases do desempenho de uma estrutura durante a sua vida útil [Adaptada do CEB (1992) e HELENE (1992)]



Fonte: (ANDRADE, 1997)

### 3.5. Custo inicial

Para cálculo do custo inicial, baseou-se na previsão do custo de implantação por  $m^2$  da ponte analisada, a partir de dados obtidos de históricos de construção de pontes similares de uma empresa em Brasília.

Para a ponte tomada como modelo, considerada de pequeno porte com 40 metros de comprimento, 12,8 m largura e altura de, aproximadamente, 6,5 m, calcula-se uma área de  $512 m^2$ . Porém, considerando que ela foi especificada para o cobrimento de 30 mm, para se utilizar cobrimento de 50 mm e 65 mm, teremos um aumento na área, a área seria de  $514 m^2$  e  $515 m^2$  respectivamente.

### 3.6. Custo do ciclo de vida

Primeiramente, foram definidos os valores e a maneira que a manutenção será realizada, gerando, a partir disso, uma planilha orçamentária. Neste trabalho, visando a didática, adotou-se que todas as manutenções serão iguais ao longo da vida útil da ponte. Porém ao se tratar de uma ponte real, é imprescindível uma vistoria detalhada para definir o nível de degradação e o

tipo de intervenção necessária, que deve ser realizada logo no início da fase de propagação do dano.

Para a verificação do investimento a ser feito ao longo da vida útil desejada, será necessário orçar o valor das manutenções referente ao ano em que elas serão realizadas. Para isso, será preciso calcular as correções monetárias sobre valor do reparo.

A fim de chegar neste valor, por se tratar de uma ponte e considerar uma obra pública, os preços serão corrigidos por base no Índice de Reajustamento de Obras Rodoviárias utilizado pelo DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos através da metodologia adotada. Inicialmente, serão analisados os resultados do software utilizados e a necessidade de manutenção e seu intervalo de tempo. Na sequência, será definido o custo inicial de construção da estrutura de concreto armado e o custo da manutenção adotada e, por fim, uma análise do custo do ciclo de vida das combinações existentes.

### 4.1. Probabilidade de corrosão

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos da probabilidade de corrosão no programa Duracon. O Gráfico 1 apresenta todos os resultados juntos podendo ser melhor analisados.

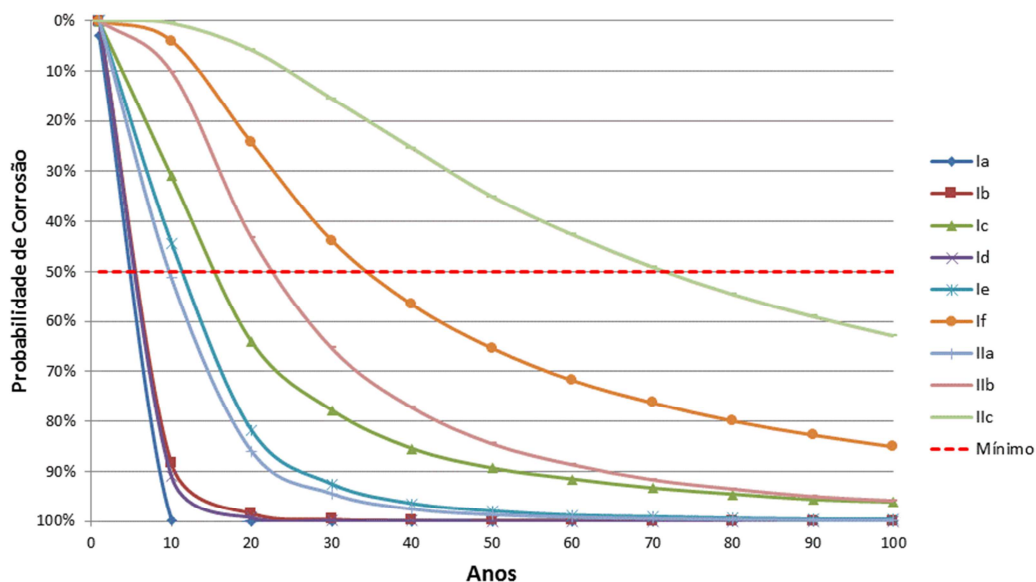
**Tabela 9-** Probabilidade de corrosão – Duracon

Anos	Probabilidade de corrosão								
	NBR 6118/2014						Eurocódigos		
	Ia	Ib	Ic	Id	Ie	If	IIa	IIb	IIc
1	3,0%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,1%
10	99,8%	88,4%	30,9%	90,9%	44,3%	4,1%	51,3%	10,2%	0,5%
20	100,0%	98,4%	64,1%	99,2%	81,9%	24,4%	86,0%	43,3%	5,9%
30	100,0%	99,6%	77,8%	99,8%	92,6%	43,8%	94,4%	65,3%	15,6%
40	100,0%	99,9%	85,5%	99,9%	96,5%	56,7%	97,5%	77,2%	25,4%
50	100,0%	99,9%	89,4%	100,0%	98,0%	65,4%	98,7%	84,5%	35,0%
60	100,0%	99,9%	91,6%	100,0%	98,9%	71,8%	99,2%	88,6%	42,6%
70	100,0%	100,0%	93,4%	100,0%	99,2%	76,3%	99,4%	91,6%	49,1%
80	100,0%	100,0%	94,6%	100,0%	99,5%	80,0%	99,6%	93,4%	54,5%
90	100,0%	100,0%	95,7%	100,0%	99,7%	82,8%	99,8%	94,9%	58,9%
100	100,0%	100,0%	96,2%	100,0%	99,7%	85,2%	99,8%	95,8%	62,8%

Segundo a literatura de Gjorv (2015), o término da vida útil seria quando a estrutura atingisse 10%, ao analisar a Tabela 9 com os resultados obtidos pelo software, a vida útil das combinações estaria, aproximadamente, entre 2 e 24 anos. Como já comentado, devido às dificuldades com os investimentos em manutenções estes baixos valores de vida útil se tornam inviáveis para uma estrutura presente no Brasil.



**Gráfico 1 - Resultados obtidos no software Duracon**



Ao analisar os resultados do Gráfico 1, observa-se que a probabilidade de corrosão adotada de 50% pode ocorrer entre 5 e 70 anos, dependendo dos parâmetros de projeto. Nota-se que as combinações com parâmetros brasileiros possuem maior probabilidade de corrosão, tanto devido ao menor cobrimento como do critério mais rigoroso com relação ao teor crítico de cloreto na superfície.

Pela análise dos dados apresentados, pode-se confirmar que o cobrimento influencia na durabilidade. Porém, não é condição suficiente, pois nos casos em que o concreto for poroso e apresente um coeficiente de difusão elevado, o ganho com o aumento do cobrimento é menor.

Nota-se que ao aumentar o cobrimento de 50 para 65 mm e mantendo o coeficiente de difusão do cloreto como de um concreto com resistência moderada, ou seja, da combinação Ia para Id, a redução na probabilidade de corrosão é baixa. Contudo, ao alterar o cobrimento para concretos com alta resistência de difusão de cloretos (Ib e Ie) e muito alta (Ic e If), a durabilidade praticamente dobra.

Conforme maior for o cobrimento, maior será o intervalo de tempo para que a concentração de cloreto atinja o valor-limite. Assim, a qualidade do

concreto (baixa permeabilidade) e a espessura do cobrimento atuam em conjunto, de modo que uma espessura menor seja compensada com uma resistência maior. Porém, deve-se atentar a cobrimentos muito pequenos, pois, apesar da baixa penetrabilidade do concreto, a ocorrência de fissuras pode resultar em um rápido transporte de íons para a armadura (NEVILLE, 2016).

Não se deve considerar essa probabilidade de corrosão como total à estrutura. De acordo com Neville (2016), o ingresso de cloretos no concreto é altamente influenciado pela sequência exata de molhagem e secagem. Partes diferentes de uma mesma estrutura podem apresentar diferentes padrões de molhagem e secagem, explicando a razão de existir variação considerável na extensão da deterioração por corrosão.

## 4.2. Manutenções

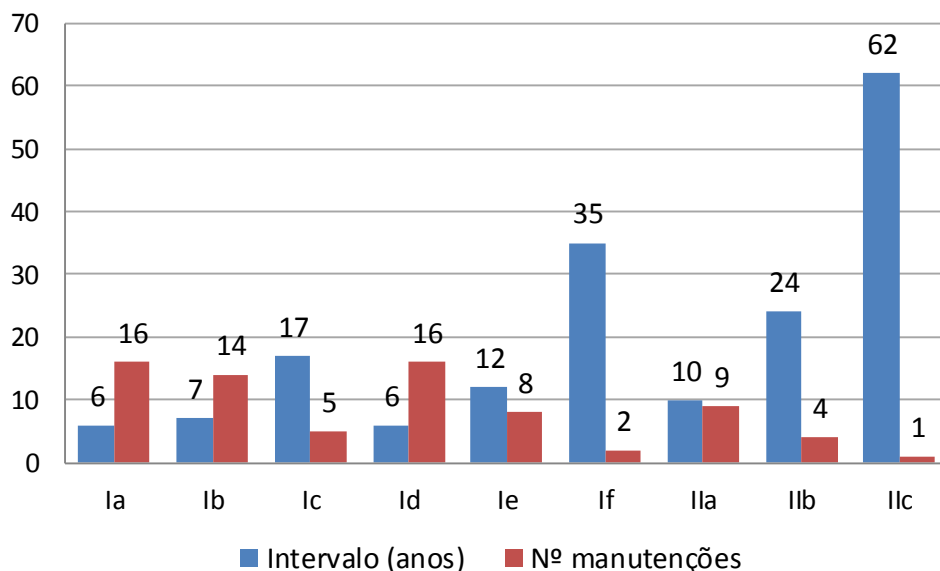
Como exposto no item 3.2.1., adotou-se a probabilidade de corrosão igual a 50%, justificada também pelo baixo valor obtido para vida útil considerando os 10% recomendado pela bibliografia.

Diante disso e com os resultados das combinações realizadas no programa Duracon, a Tabela 10 e o Gráfico 2 apresentam o intervalo de manutenções ao longo da vida útil e a quantidade necessária para que a estrutura atinja esse tempo.

**Tabela 10** - Intervalo de tempo e quantidade de manutenções para uma vida útil de 100 anos

	Intervalo (anos)	Nº manutenções
Ia	6	16
Ib	7	14
Ic	17	5
Id	6	16
Ie	12	8
If	35	2
Ila	10	9
Ilb	24	4
Ilc	62	1

**Gráfico 2** - Intervalo de tempo e quantidade de manutenções para uma vida útil de 100 anos



Pelo Gráfico 2, nota-se que as opções Ia, Ib e Id resultaram em números de manutenções elevados ao longo dos 100 anos, com intervalo entre as intervenções de 6 a 7 anos, sendo consideradas soluções inviáveis.

Portanto, a especificação mínima da norma Brasileira (Ib), cobrimento de 50 mm e fck de 40 MPa, resultaria em 14 manutenções ao longo da vida útil da ponte, enquanto o mínimo do Eurocódigo (IIb) seriam necessárias apenas 4 manutenções.

Ao diminuir o coeficiente de difusão do concreto, de Ib para Ic ou de IIb para IIc, que geralmente é obtido com o aumento da resistência à compressão, o número de manutenções cai de 14 para 5 no caso da norma Brasileira e de 4 para 1 considerando o Eurocódigo.

Os resultados obtidos demonstram a importância da qualidade do concreto, devendo a escolha da resistência característica à compressão (fck) não somente uma questão de capacidade resistente da estrutura, mas sim para garantir a durabilidade de projeto.

Por este gráfico fica claro que ao aumentar o cobrimento de 50 par 65 mm (Ic para If), o intervalo entre as manutenções dobra, de 17 para 35 anos. Corroborando com a importância do cobrimento de concreto, juntamente com uma resistência à difusão da penetração de cloreto do concreto utilizado, neste caso foi de muito alta.

Pelos resultados das combinações If e Ilc, que tem como diferença apenas o teor crítico de cloreto na superfície, observa-se que este fator influencia consideravelmente na durabilidade e neste caso são estabelecidos por norma, sendo a Brasileira mais rígida que a Europeia.

### **4.3. Custo inicial**

Devido ao número elevado de manutenções das combinações Ia, Ib, Id e IIa, estas foram descartadas. A composição de preço das demais opções serão apresentadas a seguir.

No cálculo deste valor, estimou-se o a resistência à compressão característica do concreto ( $f_{ck}$ ) igual a 40 e 60 MPa, com relação água/cimento da ordem de 0,45 e 0,35, respectivamente. Sendo o concreto de 40 MPa considerado de alta resistência à penetração de cloreto e o de 60 MPa de muito alta.

Tais considerações foram baseadas nos gráficos das figuras 2 e 6 onde se encontram relação entre tais características e o coeficiente de difusão de cloretos utilizado. Pelas pesquisas existentes sobre o assunto, verificou-se uma dificuldade em estabelecer este parâmetro, em função do número elevado de variáveis que da interferência nesse coeficiente. A Tabela 11 apresenta as características adotadas para cada combinação.

**Tabela 11** - Fatores utilizados para a composição de preço de cada combinação.

Combinação	Cobrimento (mm)	Resistência do concreto (Mpa)	Relação a/c	Volume de Concreto (m³)	Aço (kg)
Ic	50	60	0,35	376	34467
Ie	65	40	0,45	476	
If	65	60	0,35		
IIb	65	40	0,45		
IIc	65	60	0,35		

Como mencionado no item 3.5, para a obtenção dos custos iniciais será realizado uma projeção dos custos de implantação de ponte para as diferentes combinações existentes. Lembrando que tais valores foram baseados em custos referentes ao utilizado de uma empresa que atua na área de construções de pontes em Brasília. A tabela 12 apresenta os custos de implantação obtidos através da projeção, o cobrimento, a resistência e a área de cada combinação referente ao seu cobrimento, como mencionado também no item 3.5, e o custo inicial das diferentes opções.

**Tabela 12** - Custo inicial de implantação

Combinação	Cobrimento (mm)	Área (m²)	Resistência do concreto (Mpa)	Custo de Implantação (R\$/m²)	Custo Inicial (R\$)
Ic	50	514	60	R\$ 4.653,00	R\$ 2.391.642,00
Ie	65	515	40	R\$ 4.254,50	R\$ 2.191.067,50
If	65		60	R\$ 4.679,95	R\$ 2.410.174,25
IIb	65		40	R\$ 4.254,50	R\$ 2.191.067,50
IIc	65		60	R\$ 4.679,95	R\$ 2.410.174,25

As combinações Ie e IIb terão o mesmo custo inicial, bem como a If e IIc. A diferença, em ambos os casos, se deve ao teor crítico de cloreto, que depende da norma, e irá influenciar somente no intervalo das manutenções, que será apresentado a seguir.

Com o preço inicial, é observado que o aumento do cobrimento elevou os custos em, aproximadamente, 0,01% e com o aumento da qualidade do concreto teve um acréscimo de 10%. Considerando os resultados obtidos na

probabilidade de corrosão e nas manutenções necessárias, este aumento se torna favorável considerando a redução de manutenções que necessitarão ser realizadas.

## 4.4. Custo do ciclo de vida

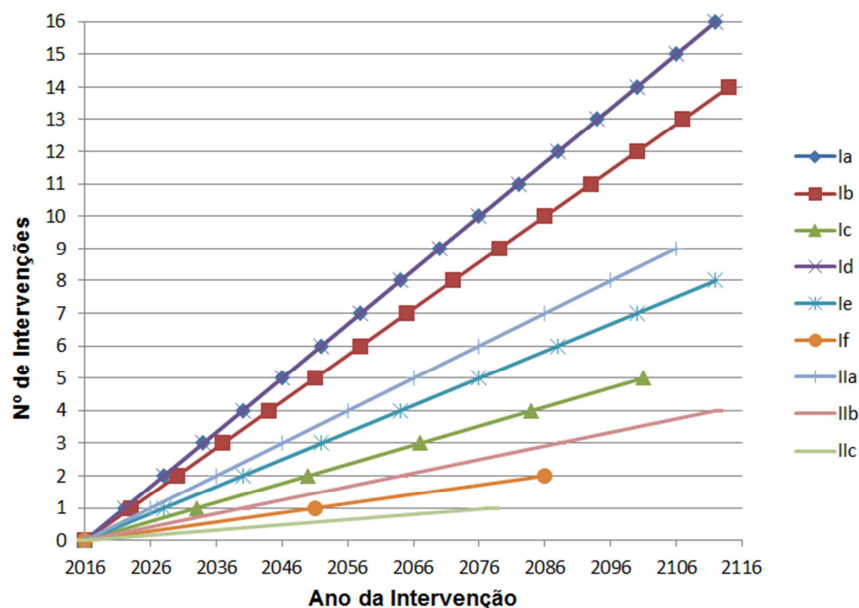
### 4.4.1. Custo da manutenção

No item 4.2, apresentou-se as quantidades e o intervalo das manutenções nas combinações realizadas. O ano de construção da ponte será adotado como 2016. A Tabela 13 apresenta os anos das manutenções de cada situação e o Gráfico 3 relaciona as combinações obtidas.

**Tabela 13** - Anos das manutenções a serem realizadas

	CONSTRUÇÃO	MANUTENÇÕES (anos)															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Ia	2016	2022	2028	2034	2040	2046	2052	2058	2064	2070	2076	2082	2088	2094	2100	2106	2112
Ib	2016	2023	2030	2037	2044	2051	2058	2065	2072	2079	2086	2093	2100	2107	2114		
Ic	2016	2033	2050	2067	2084	2101											
Id	2016	2022	2028	2034	2040	2046	2052	2058	2064	2070	2076	2082	2088	2094	2100	2106	2112
Ie	2016	2028	2040	2052	2064	2076	2088	2100	2112								
If	2016	2051	2086														
Ila	2016	2026	2036	2046	2056	2066	2076	2086	2096	2106							
Ilb	2016	2040	2064	2088	2112												
Ilc	2016	2078															

**Gráfico 3** – Anos da intervenção X número de intervenções



Para chegar a resultados que sejam os mais próximos possíveis da realidade, as combinações em vermelho, mostradas na Tabela 16, serão descartadas, pois seria economicamente inviável uma ponte ter mais de 10 manutenções em uma vida útil de 100 anos. Também será descartado a opção Ila, dado que, de acordo com a tabela da Figura 6, a relação água/cimento é muito acima da requisita pela norma europeia ( $<0,50$ ), considerando sua difusão igual a  $12,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Em verde, são apontadas as situações em que se acredita que apresentar soluções de projeto com um bom custo durante seu ciclo de vida.

Para a elaboração do custo da manutenção, adotou-se que as manutenções seriam as mesmas ao longo da vida útil e que a área a ser reparada seria 30% das áreas superficiais dos pilares e vigas e 20% da sua laje principal em todas as manutenções. No entanto, quando se tratar de uma ponte real, deve-se ter o devido controle, sendo imprescindível a apropriada inspeção, para determinar a área que necessita de reparo e que tende a aumentar com o passar dos anos.

Considerou-se apenas o teste de percussão para verificação de pontos de recuperação. As atividades levantadas na recuperação estrutural foi apenas o reparo dos locais com danos, separados em três tipos (3 cm, 5 cm e 7 cm) e realizada com graute e argamassa polimérica, sabendo que somente esses reparos não são suficientes para controlar a corrosão por cloreto.


A equipe indireta foi estimada para realizar a sinalização de via, pois se tratando de uma ponte, faz-se necessário que parte da pista fique interditada ou com desvio de trânsito. Neste trabalho não foi considerado o projeto de interdição de via, os custos com a inspeção, nem as licenças para a execução da obra, entretanto na prática devem ser avaliados, sabendo que uma ponte é obra pública.

A manutenção utilizada possui um valor final de R\$158.909,32, que se baseou na composição de preço unitário proveniente de uma empresa especializada em manutenção em pontes. A planilha orçamentária, detalhando cada serviço que a compõem está presente no Anexo A desta monografia.

#### 4.4.2. Custo do ciclo de vida

De acordo com os índices fornecidos pelo endereço eletrônico do DNIT, para estruturas de obras de arte especiais a taxa de juros anual é de 3,704%, considerando o período de fevereiro de 2015 a fevereiro de 2016, como apresentado na Figura 16.

**Figura 16 - Índices de reajustamento de obras públicas**



**ÍNDICES DE REAJUSTAMENTO DE OBRAS RODoviÁRIAS**

Mês de Referência: Fevereiro de 2016

DESCRIÇÃO DOS ÍNDICES		01/16	02/16	VARIACÃO NO MÊS	ACUMULADO NO ANO	VARIACÃO NOS ÚLTIMOS 12 MESES
TERRAPLENAGEM	DEZ/2000=100	276,411	277,811	0,506	1,077	7,637
<b>OBRAS DE ARTES ESPECIAIS</b>	<b>DEZ/2000=100</b>	<b>270,329</b>	<b>270,640</b>	<b>0,115</b>	<b>0,210</b>	<b>3,704</b>
PAVIMENTAÇÃO	DEZ/2000=100	300,265	302,034	0,589	1,237	5,623
CONSULTORIA ( Supervisão e Projetos)	DEZ/2000=100	206,784	206,103	-0,329	0,277	2,838
DRENAGEM	DEZ/2000=100	277,956	278,366	0,147	0,377	4,051
SINALIZAÇÃO HORIZONTAL	DEZ/2000=100	271,836	274,279	0,899	1,242	6,015
PAVIMENTOS CONCRETO CIMENTO PORTLAND	DEZ/2000=100	249,031	249,150	0,048	0,169	4,161
CONSERVAÇÃO RODoviÁRIA	DEZ/2000=100	268,106	268,578	0,176	0,333	3,458
LIGANTES BETUMINOSOS	DEZ/2000=100	395,181	394,515	-0,169	8,914	31,879
OBRAS DE ARTES ESPECIAIS (Sem Aço)	DEZ/2000=100	264,336	264,749	0,156	0,273	3,866
IGP - DI	AGO/1994=100	619,476	624,366	0,789	2,334	11,933
ÍNDICE NACIONAL DA CONSTRUÇÃO CIVIL	AGO/1994=100	651,759	655,263	0,538	0,931	7,166
VERGALHÕES E ARAMES DE AÇO AO CARBONO	AGO/1994=100	678,440	676,957	-0,219	-1,312	-2,039
PRODUTOS SIDERÚRGICOS	AGO/1994=100	124,624	124,923	0,240	-0,826	-3,588
PRODUTOS DE AÇO GALVANIZADO	MAR/1999=100	310,078	310,362	0,091	0,291	5,931
SINALIZAÇÃO VERTICAL	MAI/2005=100	158,114	157,884	-0,145	-0,157	7,530
ASFALTO DILUÍDO	DEZ/2000=100	478,811	480,413	0,335	11,508	40,432
CIMENTO ASFÁLTICO PETRÓLEO (CAP 7 e 20)	DEZ/2000=100	395,342	397,472	0,539	12,495	38,453
EMULSÕES (RR1C E RR2C)	DEZ/2000=100	387,412	384,324	-0,797	5,753	25,765

O reajustamento dos serviços deve ser realizado de acordo com a Instrução de Serviço nº 04/2012, publicada no Boletim Administrativo do DNIT nº 010, de 05 a 09 de Março de 2012.

Fonte: (DNIT, 2016)

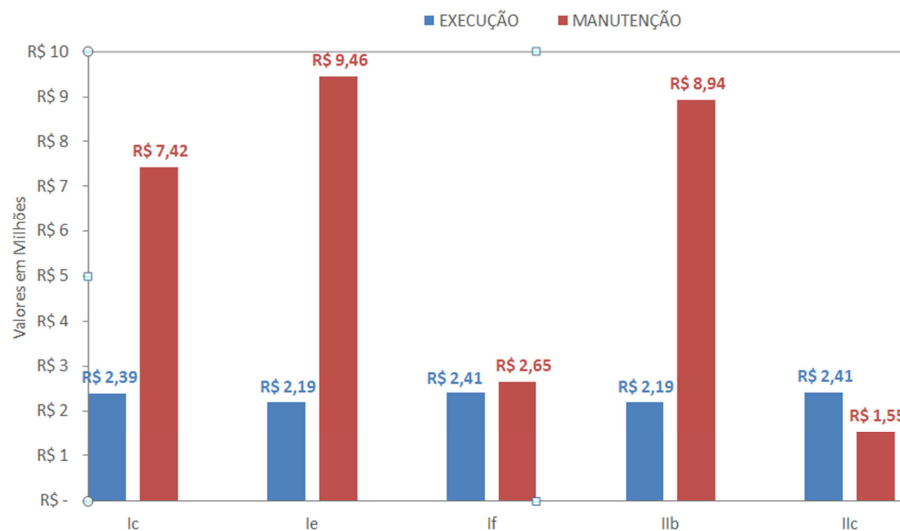
Com isso, a Tabela 14 apresenta os valores com suas devidas correções e ao final o total do custo, chegando ao custo do ciclo de vida e o Gráfico 4 faz uma comparação entre os valores das combinações, sendo que os custos estão em milhões.



**Tabela 14** - Tabela com os custos ao longo de uma vida útil de 100 anos.

		VALORES DAS MANUTENÇÕES (R\$)									CUSTO DO CICLO DE VIDA (R\$)
	CONSTRUÇÃO	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	TOTAL	TOTAL
Ic	2016 R\$ 2.391.642,00	2033 R\$ 296.643,96	2050 R\$ 553.760,09	2067 R\$ 1.033.731,61	2084 R\$ 1.929.718,40	2101 R\$ 3.602.301,68				R\$ 7.416.155,74	R\$ 9.807.797,74
Ie	2016 R\$ 2.191.067,50	2028 R\$ 246.890,45	2040 R\$ 383.582,88	2052 R\$ 595.955,92	2064 R\$ 925.910,62	2076 R\$ 1.438.546,78	2088 R\$ 2.235.007,13	2100 R\$ 3.472.432,69	2112 R\$ 158.909,32	R\$ 9.457.235,79	R\$ 11.648.303,29
If	2016 R\$ 2.410.174,25	2051 R\$ 574.470,72	2086 R\$ 2.076.760,55							R\$ 2.651.231,27	R\$ 5.061.405,52
IIb	2016 R\$ 2.191.067,50	2040 R\$ 383.582,88	2064 R\$ 925.910,62	2088 R\$ 2.235.007,13	2112 R\$ 5.394.966,60					R\$ 8.939.467,23	R\$ 11.130.534,73
IIc	2016 R\$ 2.410.174,25	2078 R\$ 1.548.162,26								R\$ 1.548.162,26	R\$ 3.958.336,51

**Gráfico 4** - Relação entre os custos das combinações.



Com os resultados obtidos pode-se observar que apesar de um valor inicial mais alto, a opção IIc apresentou um custo benefício melhor que as outras, fortalecendo a tese da análise do custo do ciclo de vida (CCV).

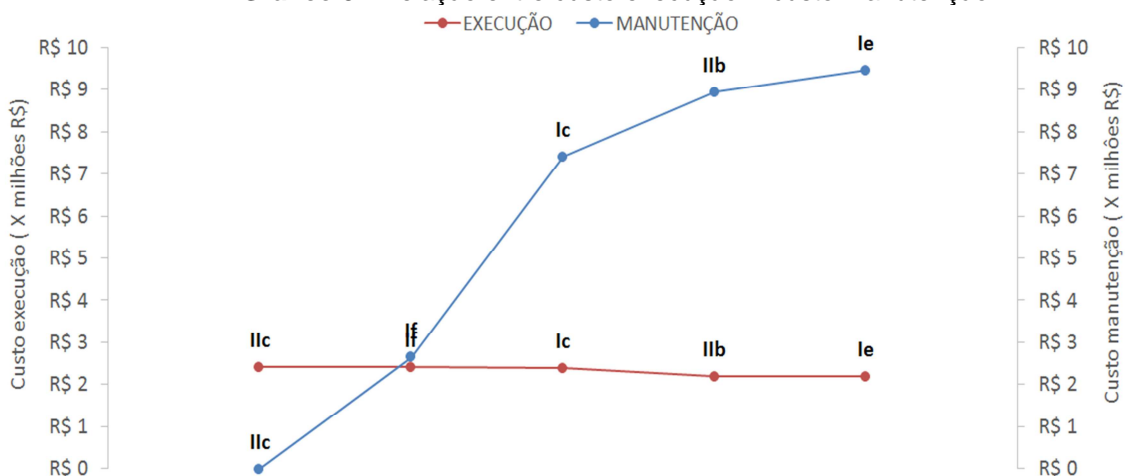
Aumentando somente o cobrimento, como nas combinações Ic e If, nota-se um aumento mínimo de, aproximadamente, 0,01% no custo iniciais. Porém esta taxa se torna desprezível ao passo que o valor de manutenções diminuiu em 65% e seu custo do ciclo de vida teve uma economia de 48%.

Nas combinações Ie e IIb; If e IIc, onde o que varia é o teor crítico de cloreto, percebe-se apesar dos custos iniciais serem iguais entre si, quanto maior for este teor acarretará em uma economia de até 42% no custo das manutenções durante esses 100 anos. Como este teor depende da agressividade do meio em que a estrutura está inserida, é indispensável que se realize estudos na região para que a especificação se adeque a um valor apropriado.

Em uma melhora na resistência característica à compressão do concreto, de 40 para 60 MPa (combinações de IIb a IIc), aumentou-se em 10% o preço inicial porém suas manutenções e o custo do ciclo de vida diminuiram em 83% e 64%, respectivamente, mostrando a influencia da resistência na durabilidade.

O Gráfico 5 apresenta os resultados dos custos na execução e manutenção das opções analisadas. Observa-se que alterando a resistência e cobrimento a influência no custo inicial é bem menor que a variação no custo da manutenção.

**Gráfico 5 - Relação entre custo execução X custo manutenção**

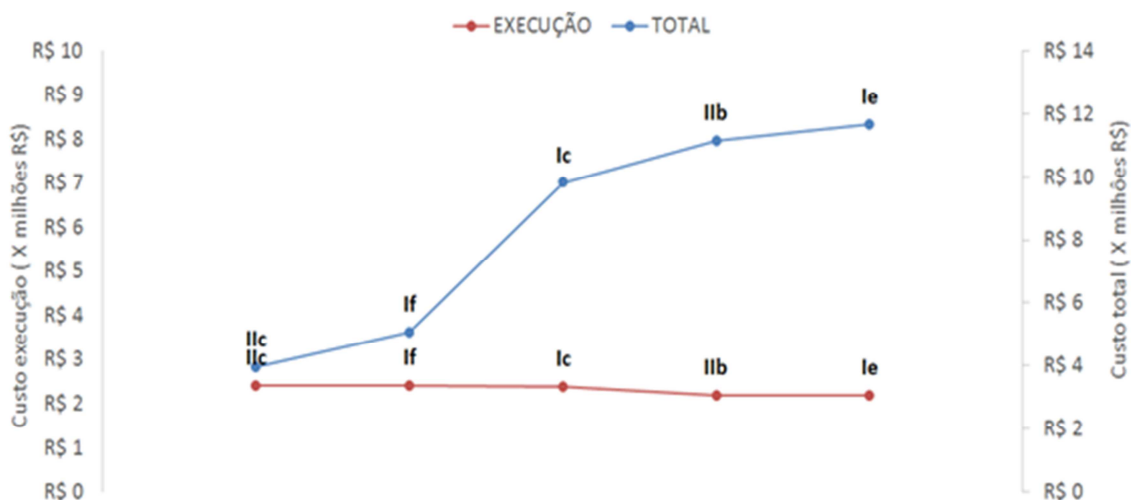


Ao analisar o Gráfico 5, nota-se que a combinação Ilc e If possui o maior custo de execução (10% acima do menor custo de execução), devido seu alto cobrimento e alta resistência. Com isso, diminui a necessidade de manutenções, tendo uma economia de 84% e 72%, respectivamente, em relação ao maior custo das manutenções e de 66% e 57%, respectivamente, em relação ao maior custo de ciclo de vida entre as combinações existentes.

Já as combinações Ic, Ie e Ilb, apesar de um menor valor menor nos custos iniciais, seus gastos com a manutenção são altos que tornam essas combinações desfavoráveis economicamente visando uma vida útil de 100 anos.

O gráfico 6 apresenta o custo de execução e o custo total, somando-se as manutenções, com o valor em milhões.

**Gráfico 6 – Custo total considerando execução e manutenção**



Observa-se que a linha de custo total ficou similar à variação da linha de manutenção apresentada no gráfico 5. Mostrando que a variação existente no custo inicial propostas neste trabalho é irrisória próxima do custo de manutenção da ponte. Mesmo com as várias simplificações realizadas na etapa de reparo bem como no intervalo das manutenções. Ou seja, na prática esses valores de manutenção serão ainda maiores.

Ou seja, para as alterações de projeto propostas neste trabalho, as melhores opções seriam o concreto de 60 MPa e cobrimento de 65 mm, que resultariam em economias de 57% para o caso da norma brasileira e 64% para o Eurocódigo quando comparadas com as opções de 40 MPa e 65 mm.

Deve-se salientar que a questão de durabilidade tem se tornado imprescindível nos últimos anos, pois obras com qualidades baixas resultarão em um passivo de manutenção altíssimo ao longo da vida útil.

## 5. Considerações Finais

Neste capítulo serão expostas algumas conclusões levantadas com essa pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1. Conclusões

O desenvolvimento teórico e prático deste trabalho a cerca da análise do custo de vida de uma ponte em concreto armado submetida a um ambiente agressivo de acordo com parâmetros das normas brasileiras e europeias, possibilitou a formulação de algumas conclusões, as quais serão apresentadas a seguir:

- O aumento do custo inicial foi insignificante perto do custo das manutenções ao longo da vida útil de projeto;
- De acordo com o software utilizado e a probabilidade adotada, as combinações com os parâmetros mínimos brasileiros necessitam de 14 manutenções visando uma vida útil de 100 anos, acarretando em um alto custo ao longo de sua vida útil;
- O cobrimento faz um papel importante na durabilidade. Ao aumentar o cobrimento e permanecendo com os outros parâmetros iguais, os resultados favorecem a durabilidade, como observado nas combinações entre Ia e Id; Ib e Ie; Ic e If. Apesar de um acréscimo de 0,01% nos custos iniciais, com esse aumento obtém-se uma economia de até 64% em suas manutenções ao longo da vida útil projetada. Sendo o cobrimento uma barreira necessária para o ingresso de agentes agressivos;
- A qualidade do concreto trabalha em conjunto com a espessura do cobrimento, ao analisar a combinação Ic pode-se observar que apesar de um menor cobrimento, com a alta resistência do concreto, seu resultado se torna satisfatório, sendo o 3º valor mais baixo. Ao aumentar o cobrimento em 15 mm e diminuir em

20 MPa sua resistência (Ie), apesar de um custo inicial 0,08% menor, seu número de manutenções teve um aumento, acarretando em um custo de ciclo de vida maior em 19%;

- O teor crítico de cloreto na superfície também influencia no intervalo entre as manutenções, ao diminuir tal parâmetro se obteve uma economia de 42% no custo das manutenções. Porém ao ser um parâmetro que dependa das condições ambientais em que a estrutura está localizada, deve-se ter o devido cuidado ao analisar a agressividade do ambiente e, assim, definir as características necessárias para que este valor seja alto suficiente para uma vida útil longa;
- Na realização da metodologia, ao se diminuir a temperatura observou-se que os resultados se tornaram bem mais satisfatórios. Portanto, conclui-se que a temperatura deve ser um parâmetro tão importante quanto os já descritos em norma visando a durabilidade;
- Para que se obtenha um custo de ciclo de vida economicamente viável, é necessário maior investimento inicial, como no cobrimento e, principalmente, na resistência do concreto, sejam realizados para que a longo prazo ocorra benefícios. Um projeto qualificado e cuidadosamente especificado em relação à agressividade do ambiente;
- Um projeto de durabilidade deve-se ter uma definição das características estruturais, dos materiais qualificados e de uma recomendada execução, de forma a garantir os parâmetros de projeto. Além disso, deve-se fornecer aos usuários planos de inspeção e de manutenção preventiva.

## **5.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Visando a continuidade e o aprimoramento dos estudos relativos ao tema desse trabalho, a seguir, serão apresentadas sugestões para o desenvolvimento de futuras pesquisas:

- Realizar os ensaios de coeficiente de difusão de cloreto e teor crítico na superfície, buscando um resultado mais realista ao utilizar o software;
- Estudar os fatores essenciais que influenciam na vida útil, para que as normas existentes se adequem e reformulem os requisitos mínimos de vida útil;
- Prover o desenvolvimento de softwares apropriados para o uso no Brasil, pois cada país apresenta características diferentes que influenciam no resultado final da vida útil;

O presente trabalho deixou claro que há diversas questões a serem ainda devidamente respondidas e aperfeiçoadas na área da Engenharia Civil, além de existirem demandas ainda não contempladas por estes estudos.

## 6. Referências Bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**. Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. 2015.

ALVES, Amara M. C. **Contribuição à análise da perspectiva de vida útil de estruturas em concreto face ao teor de cloreto registrado em Maceió-AL**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

ANDRADE, Jairo J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: Análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. **A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento**. In: *Durabilidade do Concreto: Bases Científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Ed. tradução: CASCUDO, O. 1ª Edição. São Paulo, IBRACON, 2014.

BRANDÃO, Ana Maria da Silva. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado – Aspectos relativos ao projeto**. São Carlos, 1998. Dissertação (Mestrado): Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BS EN 1992-1-1. **European Standard: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**. Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, dez. 2004.

DA SILVA, Fernanda Giannotti. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. São Carlos, 2006. Dissertação (Doutorado): Área de Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

DA SILVA, Turibio José. **Como estimar a vida útil de estruturas projetadas com critérios que visam à durabilidade**. In: *2º workshop sobre durabilidade das construções*, São José dos Campos. Anais... São José dos Campos, 2002.

GJORV, Odd E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. Revisão técnica: FIGUEIREDO, Enio P. e HELENE, P. Tradução: BECK, Leda M. M. D. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.



GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C. **Relaciones Cuantitativas entre La Carbonatación Del Hormigón y La Corrosión de Las Armaduras.** In: *Revista Iberoamericana Corrosión y Protección*, v. 11, p. 15-24, 1980.

HELENE, Paulo R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

\_\_\_\_\_. **Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto.** In: WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 1997, São Leopoldo. **Anais.** São Leopoldo, 1997. P. 31-42.

\_\_\_\_\_. **A Nova NB 1/2003 (NBR 6118) e a Vida Útil das estruturas de Concreto.** II Seminário de Patologia das Edificações do Leme/UFRGS, 2004.

**Índice de Reajustamento de Obras Rodoviárias.** Disponível em: < <http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/indices-de-reajustamentos-de-obras/indices-de-reajustamentos-de-obras-rodoviario/indice-de-reajustamento-de-obras-rodoviaras-fev-2016.pdf/view> > Acesso em 30 de junho de 2016.

LONG A. E.; HENDERSON G. D.; MONTGOMERY F. R. **Why assess the properties of near-surface concrete?** In: *Construction and Building Materials*, v. 15, p.65-79, março/abril. 2001.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. **Durabilidade e Vida útil das Estruturas de Concreto.** In: *Concreto: Ciência e Tecnologia.* G. C. Isaia. 1ª Edição. São Paulo, IBRACON, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5ª Edição. Porto Alegre. Bookman, 2016.

POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambientes urbano,** 2010. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil: Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. **Desempenho, Durabilidade e Vida útil das edificações : Abordagem Geral.** Disponível em: < <http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/view/14> > Acesso em 04 de abril de 2016.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto**. In: *Concreto: Ciência e Tecnologia*. G. C. Isaia. 1ª Edição. São Paulo, IBRACON, 2011.

Quick User Guide. **DURACON: Software for Probability – Based Durability Analysis of concrete structures in Severe Environments**. Novembro, 2010. Disponível em: < <http://www.pianc.no/duracon.php> > Acesso em 21 de fevereiro 2016.

VESIKARI, E. **Service life prediction of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement**. In: *Technical Research Centre of Finland*, report nº 553 (Escopo), Finlândia, 1988, 53 pp.

## ANEXO A

Planilha orçamentário referente a manutenção adotada para a ponte ao longo de sua vida útil de 100 anos.

PLANILHA ORÇAMENTÁRIA					
CUSTO DE REPARO - CORROSÃO DAS ARMADURAS					
CÓDIGO	DESCRIÇÃO	Unid.	Quant.	R\$ Unit	R\$ Total
<b>1.0</b>	<b>1. Serviços Preliminares</b>				
1.1	Locação de Acesso	mês	2,00	R\$ 11.300,00	R\$ 22.600,00
1.2	Montagem de acesso	unid	1,00	R\$ 18.300,00	R\$ 18.300,00
1.3	Movimentação de acesso	unid	2,00	R\$ 18.300,00	R\$ 36.600,00
1.4	Desmontagem de acesso	unid	1,00	R\$ 15.000,00	R\$ 15.000,00
1.5	Locação de Container	unidxmês	2,00	R\$ 1.150,00	R\$ 2.300,00
1.6	Locação de Banheiro Químico	unidxmês	2,00	R\$ 350,00	R\$ 700,00
1.7	Limpeza de Banheiro Químico	unidxmês	16,00	R\$ 140,00	R\$ 2.240,00
<b>2.0</b>	<b>2. Reparo (3 cm a 30 cm)</b>				
2.1	Hidrojateamento	m²	794,60	R\$ 3,08	R\$ 2.448,40
2.2	Teste de Percussão	m²	794,60	R\$ 4,01	R\$ 3.184,12
2.3	Demarcação da área de reparo com disco de corte	m²	183,94	R\$ 1,34	R\$ 245,69
2.4	Escarificação até 3,00 cm	m²	91,97	R\$ 33,39	R\$ 3.071,19
2.5	Escarificação até 5,00 cm	m²	36,79	R\$ 40,07	R\$ 1.474,17
2.6	Escarificação até 7,00 cm	m²	55,18	R\$ 53,43	R\$ 2.948,34
2.7	Limpeza da armadura com escova de aço	m²	91,97	R\$ 1,67	R\$ 153,56
2.8	Proteção da armadura	m²	91,97	R\$ 3,86	R\$ 355,46
2.9	Aplicação de Ponte de Aderência	m²	128,76	R\$ 10,98	R\$ 1.413,84
2.10	Aplicação de Argamassa Polimérica até 3,00 cm	m²	91,97	R\$ 138,01	R\$ 12.692,57
2.11	Aplicação de Argamassa Polimérica até 5,00 cm	m²	36,79	R\$ 307,81	R\$ 11.323,63
2.12	Montagem de fôrma tipo cachimbo	m²	55,18	R\$ 215,32	R\$ 11.881,67
2.13	Preenchimento com graute fluido	m³	3,86	R\$ 2.049,71	R\$ 7.917,50
2.14	Cura úmida	m²	183,94	R\$ 4,68	R\$ 859,93
2.15	Remoção de Entulho	m³	8,46	R\$ 141,73	R\$ 1.199,25
<b>TOTAL</b>					<b>R\$ 158.909,32</b>